

Simo Häkli

Simulointityökalu saarekekäytön säädön kehityksen tueksi

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 10.5.2010.

Työn valvoja:

Prof. Seppo Ovaska

Työn ohjaaja:

TkT Mikko Routimo



Aalto-yliopisto
Teknillinen korkeakoulu

Tekijä: Simo Häkli		
Työn nimi: Simulointityökalu saarekekäytön säädön kehityksen tueksi		
Päivämäärä: 10.5.2010	Kieli: Suomi	Sivumäärä:8+42
Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta		
Sähkötekniikan laitos		
Professori: Teollisuuselektroniikka		Koodi: S-81
Valvoja: Prof. Seppo Ovaska		
Ohjaaja: TkT Mikko Routimo		
<p>Nykyaikainen tehoelektroniikka ja siihen liittyvä ohjaustekniikka mahdollistaa tehoelektroniikan monipuolisen hyödyntämisen sähköverkoissa. Vaihtosuuntaajien avulla on mahdollista tuottaa tasajännitelähteestä vaihtojännite pieniin sähköverkon osiin, jotka on eristetty muusta verkosta, eli saarekkeisiin. Sopivia tasajännitelähteitä ovat esimerkiksi hajautettu energiantuotanto ja energiavarastot. Sähkön toimitusvarmuus paranee, kun verkossa on enemmän laitteita, jotka pystyvät tuottamaan laadukkaan vaihtojännitteen sähköverkkoon hallitusti.</p> <p>Tässä työssä esitellään ja arvioidaan saarekekäyttökonseptia, joka perustuu valmiiseen vaihtosuuntaajalaitteistoon. Työn alussa esitellään saarekekäytön vaatimuksia, minkä jälkeen käydään läpi suuntaajan laitteisto. Lisäksi tutkitaan kirjallisuudessa esitettyjä säätömenetelmiä saarekekäyttöille.</p> <p>Saarekekäyttöön tutustumisen jälkeen toteutetaan simulointityökalu, joka so- pii saarekekäytön säätökehityksen tueksi ja saarekekäytön toiminnan suuntaa- antavaan tutkimiseen ja esittelyyn. Simulointityökalun toiminnallisuus verifioi- daan vastaavalla prototyyppilaitteella suoritettujen mittausten avulla.</p>		
Avainsanat: tehoelektroniikka, vaihtosuuntaaja, saarekekäyttö, tehoelektroniik- kasimulointi		

Author: Simo Häkli

Title: A Simulation Tool for Control Design of an Island Mode Inverter

Date: 10.5.2010

Language: Finnish

Number of pages:8+42

Faculty of Electronics, Communications and Automation

Department of Electrical Engineering

Professorship: Industrial Electronics

Code: S-81

Supervisor: Prof. Seppo Ovaska

Instructor: D.Sc.(Tech.) Mikko Routimo

Modern power electronics and control technology allow versatile utilization of power electronics in electrical networks. Using power electronic inverters, it is possible to produce an AC voltage from a DC voltage source to small isolated parts of networks called islands. Suitable DC sources include distributed energy production and energy storage. Reliability of electricity distribution is improved if more devices capable of producing a good quality AC-voltage controllably are added to electrical networks.

In this thesis, a concept for an island mode inverter based on existing inverter hardware is presented and evaluated. Requirements for an island mode and the hardware of the inverter are explained at the beginning of the thesis. Control methods of an island mode inverter found in the literature are also discussed.

After familiarizing ourselves with the island mode, a simulation tool to support control design and indicative testing and demonstration of the island mode inverter is implemented. Functionality of the simulation tool is verified using measurements from an equivalent prototype device.

Keywords: power electronics, inverter, island mode, simulation of power electronics

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy Drivesin System AC -tulosityksikössä Helsingissä.

Haluan kiittää Professori Seppo Ovaskaa ja ohjaajaani TkT Mikko Routimoa hyvästä ja innostavasta ohjauksesta.

Lisäksi kiittäisin perhettä ja ystäviä kannustuksesta.

Otaniemi, 10.5.2010

Simo Häkli

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
1.1 Pienjännitteinen tasavirtasähkönjakelu	2
2 Saarekekäyttö	3
2.1 Käsitteitä ja menetelmiä	3
2.1.1 Avaruusvektori ja synkroninen koordinaatisto	3
2.1.2 Kolmivaihejärjestelmän symmetriset komponentit	4
2.2 Vaatimukset	4
2.2.1 Jännitteen laatu	4
2.2.2 Turvallisuusvaatimukset	6
2.3 Simuloitava saarekekäyttö	6
2.3.1 Silta	6
2.3.2 Modulointi	6
2.3.3 Suodatus ja muuntaja	8
2.4 Jännitteen säätö	12
2.4.1 Kirjallisuudessa esitettyjä ratkaisuja	13
3 Simulaattori	17
3.1 Ohjelma	17
3.1.1 Käyttöliittymä	17
3.2 Mallinnetut osat	18
3.2.1 Silta	18
3.2.2 Suodatin	20
3.2.3 Muuntaja	21

3.2.4	Kuormat	22
3.3	Differentiaaliyhtälöiden ratkaiseminen	24
3.3.1	Ratkaisumenetelmiä	24
3.3.2	Virhearvio	25
3.3.3	Valittu menetelmä	25
4	Simuloinnit ja vertailumittaukset	26
4.1	Vertailumittausten testijärjestely	26
4.2	Simulaatiot ja mittaukset	27
4.2.1	Tyhjäkäyntijännite	27
4.2.2	Epäsymmetrinen kuorma	29
4.2.3	Epälineaarinen kuorma	31
4.2.4	Oikosulku	36
5	Yhteenveto	39
	Viitteet	41

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

C	kapasitanssi
h	integroimisaskel
i	virta
i_1	suuntaajan virta
i_2	kuorman tai verkon virta
J	sähkökoneen hitausmomentti
L	induktanssi
p	napapariluku
R	resistanssi
s	Laplacen operaattori
u, v	jännite
u_1	suuntaajan jännite
u_2	kuorman tai verkon jännite
u_C	suodatinkondensaattorin jännite
z	z-tason muuttuja
Θ	synkronisen koordinaatiston vaihekulma
τ_e	sähköinen vääntömomentti
τ_l	kuorman vääntömomentti
ψ	vujo
ω_r	sähkökoneen kulmanopeus

Merkinnät

\underline{u}	jännitteen avaruusvektori
\underline{u}^s	avaruusvektori \underline{u} synkronisessa koordinaatistossa
\underline{u}^*	avaruusvektorin \underline{u} konjugaatti
$\text{Im}(\underline{u})$	avaruusvektorin \underline{u} pysty akselin suuntainen komponentti
U	jännitteen tehollisarvo
$U(s)$	jännitteen $u(t)$ Laplace-muunnos

Alaindeksit

d	synkronisen koordinaatiston avaruusvektorin d -suuntainen komponentti
n	negatiivisen sekvenssin suure
p	positiivisen sekvenssin suure
q	synkronisen koordinaatiston avaruusvektorin q -suuntainen komponentti
r	sähkökoneen roottoripiiriin liittyvä suure
ref	ohjearvo
s	sähkökoneen staattoripiiriin liittyvä suure
α	avaruusvektorin α -suuntainen komponentti
β	avaruusvektorin β -suuntainen komponentti

Lyhenteet

CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CSV	comma separated values
DSU	diode supply unit
IGBT	insulated gate bipolar transistor
INU	inverter unit
ISU	IGBT supply unit
LVDC	low voltage direct current
SFS	Suomen standardoimisliitto
THD	total harmonic distortion
UPS	uninterruptable power supply

1 Johdanto

Tehoelektroniikan ja siihen liittyvän ohjaustekniikan kehitys mahdollistaa nyt ja tulevaisuudessa monipuolisempien sähköverkkojen rakentamisen. Tehoelektronisten suuntaajien avulla voi verkkoon liittää monenlaista hajautettua sähköntuotantoa kuten aurinkokennoja, polttokennoja ja tuuliturbiineja. Tällä hetkellä nämä toimivat yleensä verkkoliitäntäisinä, eli vaativat jännitteisen sähköverkon. Tulevaisuudessa jännitteen hävitessä verkosta voisi katkosalueella tuottaa hajautetun tuotannon ja suuntaajatekniikan avulla korvaavan jännitteen rajattuun verkon osaan, eli saarekkeeseen. Tämä lisäisi sähköön toimitusvarmuutta. Energiavarastojen lisääminen hajautetun tuotannon yhteyteen voisi tuoda vielä lisävarmuutta silloin, kun hajautetun tuotannon teho ei riitä kattamaan kulutusta. Suuntaajien avulla voisi luoda verkon myös alueelle, jossa on pientä hajautettua tuotantoa, mutta ei yleistä sähköverkkoa. Haasteena hajautetussa tuotannossa on uusien suojausmenetelmien kehittäminen, koska nykyinen verkon suojaus on kehitetty keskitettyä tuotantoa silmälläpitäen. Lisäksi on kehitettävä uusia säätömenetelmiä, joiden avulla suuntaajat voivat toimia verkkoliitäntäisinä tai luoda oman verkon ja tarvittaessa vaihtaa tilaa näiden välillä ilman, että sähköön kuluttajille aiheutuu havaittavaa sähkökatkosta.

Tässä diplomityössä keskitytään pelkästään suuntaajan jännitesäädettyyn tilaan. Jännitesäädettyä vaihtosuuntaajaa voidaan käyttää muissakin sovelluksissa esimerkiksi pienjännitteinen tasavirtasähkönsiirto, eli LVDC ja varmistetut teholähteet, eli UPS. Molemmille sovelluksille yhteistä on, että tavoitteena on tuottaa tasajännitteestä laadukas standardinmukainen vaihtojännite.

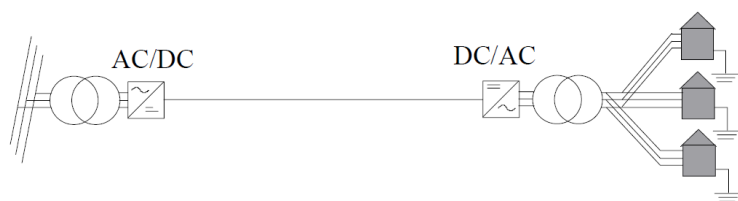
Työn ensimmäinen tavoite on esitellä ja arvioida valmiille verkkovaihtosuuntaajalaitteistolle kehitettyä jännitesäädetyssä tilassa toimivaa suuntaajaa, joka tuottaa 3-vaiheisen sähköverkon tasajännitteestä. Toisena tavoitteena on toteuttaa edellisen pohjalta simulointityökalu saarekeverkkosuuntaajan jännitesäädön kehityksen tueksi.

Simuloinnin käyttöä tuotekehitysprosessissa voi perustella monin tavoin. Simuloinnalla voi testata laitteistoa erilaisilla komponenteilla ja piiriratkaisuilla ilman, että niitä tarvitsee hankkia ja rakentaa. Uusia säätöratkaisuja voi kokeilla simuloimalla nopeasti. Mahdollisesti vaarallisia ja kalliita ongelmatilanteita voi tutkia turvallisesti ja edullisesti. Simuloimalla voi lisäksi tutkia laitteen perimmäistä toimintaa ilman epäideaalisuuksia, kuten esimerkiksi mittauskohinaa, hajakapasitanssia ja vuotoinduktanssia. [1]

Luvussa 2 selitetään muutamia suuntaajan analysointiin liittyviä käsitteitä ja menetelmiä, tutkitaan, millaisia suuntaaja- ja säätöratkaisuja on raportoitu kirjallisuudessa, ja esitellään suuntausratkaisun komponentit ja säätökonsepti. Luvussa 3 esitellään pohja, jolle simulaattori on toteutettu, ja mallit joita simulaattorissa käytetään, ja valitaan differentiaaliyhtälöinä esitettyjen mallien ratkaisuun sopiva menetelmä. Simulaattori verifioidaan luvussa 4 vertaamalla simulointeja suuntaajan prototyypillä tehtyihin mittauksiin.

1.1 Pienjännitteinen tasavirtasähkönjakelu

Pienjännitteisessä tasavirtasähkönjakelussa, eli LVDC:ssä, sähköverkon vaihtojännitteisiä pienjänniteosuuksia korvattaisiin tasajännitteisellä ratkaisulla kuvan 1 mukaisesti. Viitteessä [2] käsitellään yleisesti LVDC-järjestelmää tekniseltä ja taloudelliselta kannalta. LVDC:n todetaan olevan taloudellinen vaihtoehto esimerkiksi pienjänniteverkon vahvistamiseen tasavirtajakelulla keskijänniteverkon laajentamisen sijasta. Kustannukset tulisivat pääosin tehoelektroniikasta, sillä käytössä olevia pienjännitekaapeleita voi käyttää tasajännitteen siirtoon sellaisenaan. Tasajännitteen ansiosta on mahdollista käyttää suurempaa jännitteen tehollisarvoa ja siten siirtää enemmän tehoa samoilla kaapeleilla. Huonona puolena on järjestelmän monimutkaisuuden lisääntyminen ja uudenlaisten vikatilanteiden mahdollisuus.



Kuva 1: LVDC-topologia kolmivaiheisella vaihtosuuntauksella [2]

Artikkelin [2] LVDC-topologioista tämän työn kannalta kiinnostavimmassa vaihtosuuntaus tehtäisiin yhteisesti usealle asiakkaalle kolmivaiheisena kuvan 1 mukaisesti, mikä asiakkaiden kannalta vastaisi nykyistä järjestelmää. Tasasuuntaus tapahtuisi keskijänniteverkon läheisyydessä pienjännitemuuntajan jälkeen. Yhteensopivuus nykyiseen järjestelmään vaatii lisäksi jakelumuuntajan ennen asiakkaita, jotta asiakasverkon ja jakeluverkon välille saadaan galvaaninen erotus ja asiakasverkkoon nollajohdin. Tässä työssä käsitelty suuntaaja on suunniteltu tällaiseen ratkaisuun.

Tasajännitteen siirtoon on mahdollista käyttää nykyisiä pienjänniteverkon kaapeleita [2]. Suurin sallittu tasajännite nykyisissä kaapeleissa on 1500 V. Se riittää kaikkien jännitehäviöidenkin jälkeen pääjännitteen huippuarvoltaan 975 V:n kolmivaiheiseen vaihtosuuntaukseen.

2 Saarekekäyttö

Tässä kappaleessa käsitellään kirjallisuudessa esitettyjä vaihtojännitelähteenä toimivien suuntaajien säätömenetelmiä ja esitellään tässä työssä simuloitava suuntaajaratkaisu.

2.1 Käsitteitä ja menetelmiä

2.1.1 Avaruusvektori ja synkroninen koordinaatisto

Avaruusvektoria on alunperin käytetty kolmivaiheisten vaihtovirtakoneiden dynaamisissa malleissa, koska se helpottaa huomattavasti muutostilanteiden tutkimista verrattuna kolmivaihesuurella laskentaan [3]. Vektori sopii myös kolmivaiheisten suuntaajien analysointiin. Kolmivaihejärjestelmän hetkellisarvot u_A , u_B ja u_C muunnetaan vektoriksi, joka määritellään:

$$\underline{u} = u_\alpha + ju_\beta \quad (1)$$

$$v_\alpha = \frac{2}{3}(u_A - \frac{u_B + u_C}{2}) \quad (2)$$

$$v_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(u_B - u_C) \quad (3)$$

Avaruusvektori ei kuvaa suureiden yhteismuotoista komponenttia, joten tarvittaessa se täytyy laskea erikseen.

$$u_0 = \frac{1}{3}(u_A + u_B + u_C) \quad (4)$$

Avaruusvektori muutetaan synkroniseen koordinaatistoon seuraavalla tavalla, kun synkronisen koordinaatiston vaihekulma vakiokoordinaatistoon nähden on Θ ja vektori synkronisessa koordinaatistossa on \underline{u}^s .

$$\underline{u}^s = \underline{u}e^{j\Theta} \quad (5)$$

Kun synkronisen koordinaatiston vaaka-akseli nimetään d-akseliksi ja pystyakseli q-akseliksi, vektori voidaan jakaa komponentteihin

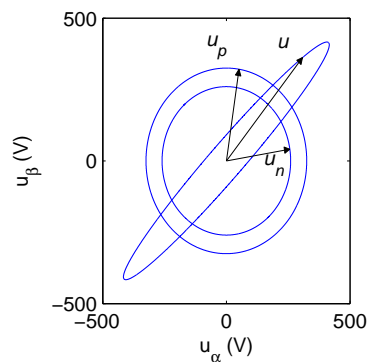
$$\underline{u}^s = u_d + ju_q \quad (6)$$

2.1.2 Kolmivaihejärjestelmän symmetriset komponentit

Epäsymmetrisen kolmivaihejärjestelmän voi kuvata kahdella symmetrisellä kolmivaihejärjestelmällä, joita vastaavat avaruusvektorit pyörivät eri suuntiin.

Normaalia symmetristä kolmivaihejärjestelmää kutsutaan positiiviseksi sekvenssiksi. Negatiivisella sekvenssillä tarkoitetaan kolmivaihejärjestelmää, jossa vaiheet ovat vastakkaisessa järjestyksessä positiiviseen sekvenssiin nähden. Yhdistettynä positiivinen ja negatiivinen sekvenssi mahdollistavat epäsymmetrisen kolmivaihejärjestelmän esittämisen matemaattisesti helpolla tavalla.

Negatiivista sekvenssiä vastaava avaruusvektori pyörii ympyränmuotoista rataa samalla taajuudella, mutta eri suuntaan kuin positiivista sekvenssiä vastaava vektori. Summattuna nämä vektorit piirtävät ellipsinmuotoisen radan.



Kuva 2: Kolmivaihejärjestelmän symmetriset komponentit vektorimuodossa

2.2 Vaatimukset

Vaihtosuuntausratkaisun tulee toteuttaa jännitteen laatuun ja suojaukseen liittyvät standardit, jotta sitä voidaan käyttää yleisessä sähköverkossa.

2.2.1 Jännitteen laatu

Jännitteen laadun Suomessa määrää CENELEC:in hyväksymä eurooppalainen standardi EN 50160, jonka Suomen standardisoimisliitto SFS on julkaissut suomenkielisenä nimellä SFS-EN 50160. [4]

Standardi asettaa rajat jännitteen laadulle asiakkaan liitännäspisteessä. Nämä rajat ovat voimassa normaaliolosuhteissa, eli silloin kun verkossa ei ole vikatilannetta.

Taajuus

Taajuuden tulee olla yleisessä jakeluverkossa välillä 49,5 Hz ja 50,5 Hz 99,5 % ajasta ja jatkuvasti välillä 47 Hz ja 52 Hz.

Yleisestä sähköverkosta erillisessä saarekkeessa taajuuden on oltava välillä 49 Hz ja 51 Hz 95 % ajasta ja aina välillä 42,5 Hz ja 57,5 Hz.

Jännitteen suuruus

Nelijohtimisessa kolmivaihejärjestelmässä nimellijännitteen tehollisarvo on 230 V vaiheen ja nollan välillä. 95 % jakelujännitteen 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista tulisi olla välillä ± 10 % ja kaikkien 10 minuutin keskiarvojen tulisi olla välillä -15 % ja +10 %. Standardi ei määrittele tarkkaan sallittuja nopeiden jännitemuutosten määriä eikä muutosajoja. Nopeita jännitemuutoksia, jotka ovat suuruudeltaan maksimissaan 10 % voi olla muutamia päivässä. Jännitekuoppia, joissa jännite on alle 90 % nimellisarvostaan, ja joiden kesto on 10 millisekunnista minuuttiin, voi olla vuodessa kymmenistä tuhanteen.

Symmetria

95 % jakelujännitteen perustaajuisen negatiivisen sekvenssin tehollisarvon 10 minuutin keskiarvoista on oltava maksimissaan 2 % perustaajuisen positiivisen sekvenssin tehollisarvon 10 minuutin keskiarvoista. Standardin [4] mukaan jännite-epäsymmetriaa voi approksimoida riittävän tarkasti esimerkiksi seuraavalla tavalla. Tämä laskentatapa ei ota huomioon vaihe-epäsymmetriaa.

$$\text{jännite-epäsymmetria} = \sqrt{\frac{6(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)}{(U_{12} + U_{23} + U_{31})^2}} - 2 \quad (7)$$

Yliaallot

Jännitteen kokonaissärökertoimen, eli THD:n, tulee olla maksimissaan 8 %. Standardissa kokonaissärökerroin on määriteltä 40 ensimmäisen harmonisen komponentin perusjännitteeseen suhteellisen suuruuden neliösummaksi. Jännite-THD:n voi laskea esimerkiksi seuraavalla tavalla.

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_{40}^2}}{U_1} \quad (8)$$

Lisäksi yksittäisille harmonisille jännitteille on määrätty rajat. Taulukossa 1 on joidenkin merkittävien harmonisten jännitteiden rajoja.

Taulukko 1: SFS-EN 50160 -standardin määrittämät rajat muutamille yksittäisille harmonisille

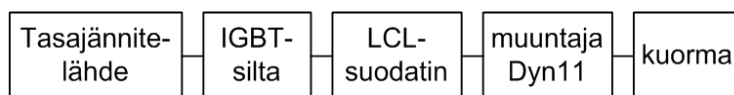
järjestysluku	3	5	7	11	13
suhteellinen jännite	5,0 %	6,0 %	5,0 %	3,5 %	3,0 %

2.2.2 Turvallisuusvaatimukset

Sähköverkon oikosulkusuojaus perustuu verkon syöttämään oikosulkuvirtaan, joka polttaa sulakkeen tai avaa virtasuojakytkimen. Standardit eivät määrittele vaadittua oikosulkuvirtaa sähkön jakelijalle. Saarekeverkkosuuntaajan on kuitenkin pystyttävä syöttämään sovelluskohteessa suojauksen mitoitusvirtaan käytetty oikosulkuvirta.

2.3 Simuloitava saarekekäyttö

Saarekekäyttö on toteutettu valmiin verkkovaihtosuuntaajan laitteiston pohjalle. Laitteiston lohkokaavio on kuvassa 3. Tasajännitelähteenä voi olla esimerkiksi pienjännitteinen tasavirtasähkönsiirto tai toinen suuntaaja. Tasajännite suunnataan vaihtojännitteeksi IGBT-sillalla, jonka nimellinen pääjännitteen tehollisarvo on 690 V. Siltaa ohjaa DTC-modulaattori. DTC:n soveltamista modulointiin käsitellään tarkemmin myöhemmin. Suuntaajan tuottama vaihtojännite suodatetaan LCL-suodattimella. Sen perässä on kolmio-tähti-muuntaja, joka laskee jännitetasoa normaalisissa pienjänniteverkossa käytettävään 400 V:iin. Lisäksi muuntaja nostaa virtatasoa, mikä helpottaa oikosulkuvirtavaatimusten toteuttamista.



Kuva 3: Simuloitavan saarekekäytön lohkokaavio

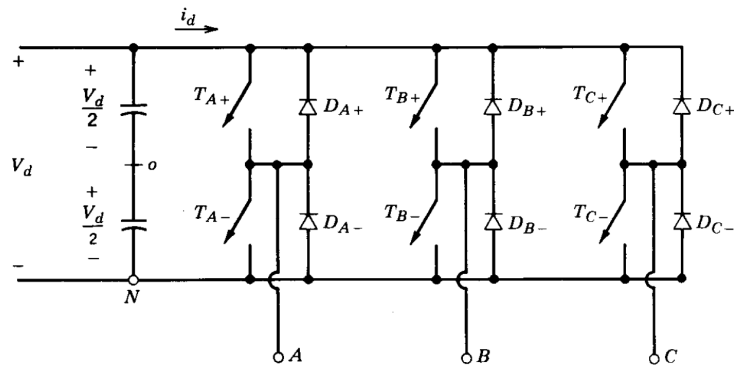
2.3.1 Silta

Vaihtosuuntaajana on kolmivaiheinen IGBT-silta. Kuvassa 4 on sillan piirikaavio, jossa transistorit on esitetty ideaalisina kytkiminä. Suuntaaja muodostuu kuudesta vastarinnankytketystä transistori-diodi-parista. Näiden avulla jokaiseen vaiheeseen voidaan kytkeä tasajännitepiirin positiivinen tai negatiivinen napa. Transistoreilla ohjataan vaiheiden jännitteitä ja diodit varmistavat, että virralla on aina kulkutie, vaikka transistorit olisivatkin johtamattomassa tilassa. Tasajännitteen arvo määrää suurimman vaiheiden välisen jännitteen. Eri kytkentävaihtoehdoilla saadaan seitsemän erilaista jännitetilaa nollajohtimettomaan kolmivaihejärjestelmään. [5]

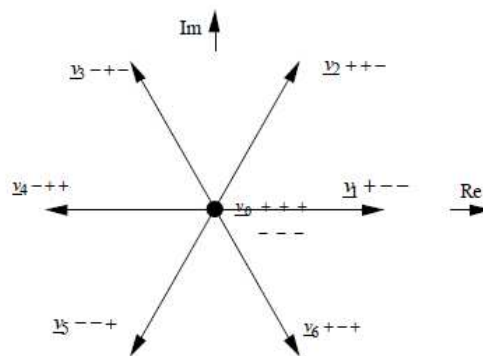
Kaikki mahdolliset nollajohtimettoman kolmivaihejärjestelmän jännitetilat, jotka suuntaajalla on mahdollista tuottaa, voi kuvata seitsemällä avaruusvektorilla. Kuvassa 5 on esitetty nämä vektorit, kun $+$ tarkoittaa vaiheen kytkemistä tasajännitteen positiiviseen napaan ja $-$ kytkemistä negatiiviseen napaan.

2.3.2 Modulointi

Pulssinleveysmoduloinnilla tarkoitetaan kytkinten ohjaamista siten, että niiden jännitepulssit muodostavat keskimäärin halutun jännitteen tietyssä aikaikkunassa. Mal-



Kuva 4: Kolmivaiheinen vaihtosuuntaaja [5]



Kuva 5: Suuntaajan jännitevektorit

linnettavan sillan modulointiin käytetään DTC:tä skalaarimoodissa. Skalaarimoodissa DTC:n vuo-ohjetta ei lasketa momentin takaisinkytkennällä, vaan se luodaan itse sovelluksen oletetun käyttäytymisen perusteella. Esimerkiksi sähkökoneen pyörimisnopeus on verrannollinen vuon amplitudiin ja taajuuteen.

DTC on alunperin kehitetty sähkökoneiden momenttisäätöä varten [6]. Ideana on ohjata suuntaajan jännitteen synnyttämää vuota mahdollisimman nopeasti, koska sen amplitudi ja vaihe vaikuttavat merkittävästi momenttiin.

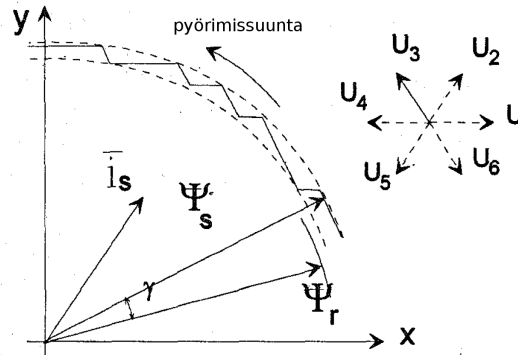
Vuon yhteys jänniteeseen on

$$\underline{\Psi} = \int \underline{u} dt \quad (9)$$

Jännitelähtesovelluksessa ei ole todellista vuota, joten siinä DTC:llä ohjataan yhtälön (9) perusteella halutusta jännitteestä laskettua näennäistä vuota [7].

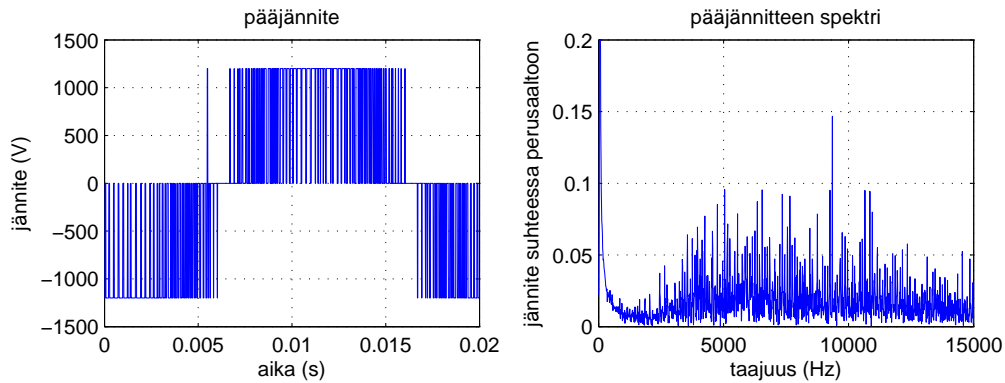
DTC:ssä on kaksi hystereesivertailuun perustuvaa säädintä, jotka ohjaavat vuon vaihetta ja amplitudia. Jännitevektori valitaan siten, että saadaan aikaan haluttu vuon muutos mahdollisimman nopeasti. Tehokkaimmin vuota eri vuon vaiheella muuttavat jännitevektorit on tallennettu taulukkoon, josta valitaan sopivin hystereesivertailujen perusteella. Vuon vaihetta tiettyyn suuntaan muuttavia vektoreita

on kaksi tai kolme. Nämä kasvattavat tai pienentävät vuovektorin pituutta. Näiden välillä valitaan vertaamalla vuovektorin pituutta haluttuun hystereesivertailun avulla. Hystereesirajat määrätään halutun kytkentätaajuuden perusteella. Kuvassa 6 on esimerkki DTC:n ohjaaman vuon radasta.



Kuva 6: Esimerkki DTC:llä ohjatun vuon radasta [6]

Hystereesivertailujen takia DTC:n tuottamat jännitepulssit ovat satunnaisen pituisia. Siksi tuotetussa jännitteessä esiintyy taajuuksia laajalla spektrillä. Kuvassa 7 on simulaattorilla tehty esimerkki DTC:llä 1200 V:n tasajännitteestä suunnatusta perusaalloltaan 975 V:n pääjännitteestä ja sen spektristä suhteessa perusaaltoon. Perusaaltoa ei ole sovitettu spektrikuvaan, jotta kytkentätaajuiset komponentit näkyvät selkeämmin. Spektrikuvasta nähdään, että kytkentöjen aiheuttamia jännitekomponentteja on pieniltä taajuuksilta alkaen ainakin 15 kHz:in. Käytetty keskimääräinen kytkentätaajuus vaihetta kohden on 3,5 kHz. Spektrissä ei kuitenkaan ole havaittavissa piikkiä keskimääräisen kytkentätaajuuden kohdalla.



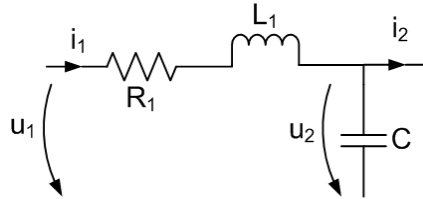
Kuva 7: DTC:n tuottama pääjännite ennen suodatusta

2.3.3 Suodatus ja muuntaja

Jännitelähtesovelluksessa moduloinnin tuottamat jänniteylijäämät täytyy suodattaa, jotta jännitteen laadussa päästään standardin [4] asettamiin rajoihin.

Useimmiten UPS:ssä on LC-suodatin, koska LCL-suodattimen ylimääräinen kuristin ei UPS:ssä parantaisi jännitesuodatusta kuin täysin resistiivisillä kuormilla, kuten myöhemmin huomataan. Lisäksi LC-suodattimen jännitesäätö on helpompi toteuttaa.

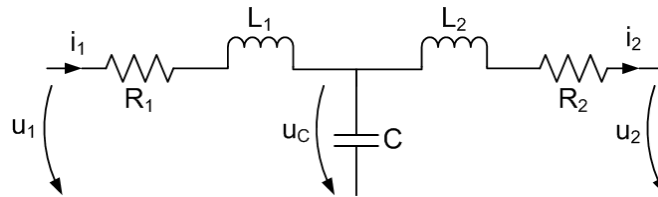
LC-suodattimen yksivaiheinen sijaiskytkentä on kuvassa 8. u_1 on suuntaajan tuotama jännite, u_2 kuorman jännite, i_1 suuntaajan virta ja i_2 kuorman virta. R_1 ja L_1 ovat suuntaajan puoleisen kuristimen resistanssi ja induktanssi ja C on suodattimen kondensaattorin kapasitanssi.



Kuva 8: LC-suodattimen yksivaiheinen sijaiskytkentä

Verkkoliitännäisissä suuntaajissa käytetään usein LCL-suodatinta, koska verkonpuoleinen kela parantaa virtasuodatusta verrattuna L- tai LC-suodattimeen. Verkonpuoleinen kela myös vakiinnuttaa suodattimen resonanssitaajuuden verrattuna LC-suodattimeen, sillä ilman sitä resonanssitaajuus sähköverkon induktanssin ja suodatinkapasitanssin välillä riippuisi siitä, mikä verkon induktanssi on kussakin liitännäspisteessä. Lisäksi suoraan verkkoon kytketty kapasitanssi ottaisi merkittävästi loisivirtaa eikä paranna virtasuodatusta merkittävästi.

LCL-suodattimen yksivaiheinen sijaiskytkentä on kuvassa 9. Lisänä LC-suodattimen kuvaan u_C on kondensaattorin jännite ja R_2 ja L_2 ovat suodattimen verkon puoleisen kuristimen resistanssi ja induktanssi.



Kuva 9: LCL-suodattimen yksivaiheinen sijaiskytkentä

Viitteessä [8] käsitellään LCL-suodattimen mitoitusta yksivaiheiselle suuntaajalle, joka voi toimia verkkoon liitettynä tai verkon ainoana jännitelähteenä. Esitetyssä ratkaisussa ei ole muuntajaa, vaan kuorma tai verkko on kytketty suoraan suodattimen lähtöön.

Suuntaajan puoleinen induktanssi valitaan halutun virtasuodatuksen, häviöiden, koon ja hinnan perusteella. Kapasitanssin arvo valitaan verkkoliitännäiselle suuntaajalle siten, että suodattimen ottama loisivirta ei heikennä suuntaajan hyötysuhdetta merkittävästi. Suuntaajalle, joka toimii lisäksi jännitelähteenä, suositellaan

kapasitanssin mitoitusta suuremmaksi, jotta saadaan helpommin standardin mukaiseen sähkön laatuun [4] riittävä jännitevaimennus. Verkon tai kuorman puoleinen induktanssi valitaan siten, että suodattimen resonanssitaajuus asettuu jännitteen perustaajuuden ja suuntaajan kytkentätaajuuden välille, jolloin vältetään näiden aiheuttama resonointi. [8]

Simuloitava suodatusratkaisu

Saarekekäytön toteutukseen käytetyssä laitteistossa on LCL-suodatin ja muuntaja. Jos käytetään muuntajan mallina pelkkää oikosulkuimpedanssia, voi sen summata suoraan suodattimen kuorman puoleisen kuristimen impedanssiin. Malli on riittävän tarkka säädön kehitykseen ja perustaajusten jännitehäviöiden tutkimiseen, kun käytetään tunnettuja perustaajuudella mitattuja komponenttiarvoja.

LCL-suodattimen ja muuntajan yhdistetty yksivaiheinen sijaiskytkentä vastaa kuvaa 9, kun L_2 ja R_2 ovat kuorman puoleisen kuristimen ja muuntajan yhdistetty induktanssi ja resistanssi.

Kuvasta 9 saadaan seuraavat siirtofunktiot virtojen ja jännitteiden summina, kapasitanssin ja induktanssin perusyhtälöiden ja Laplace-muunnoksen avulla.

$$\underline{I}_1 = (\underline{U}_1 - \underline{U}_c) \frac{1}{sL_1 + R_1} \quad (10)$$

$$\underline{U}_c = (\underline{I}_1 - \underline{I}_2) \frac{1}{sC} \quad (11)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_c - \underline{I}_2(sL_2 + R_2) \quad (12)$$

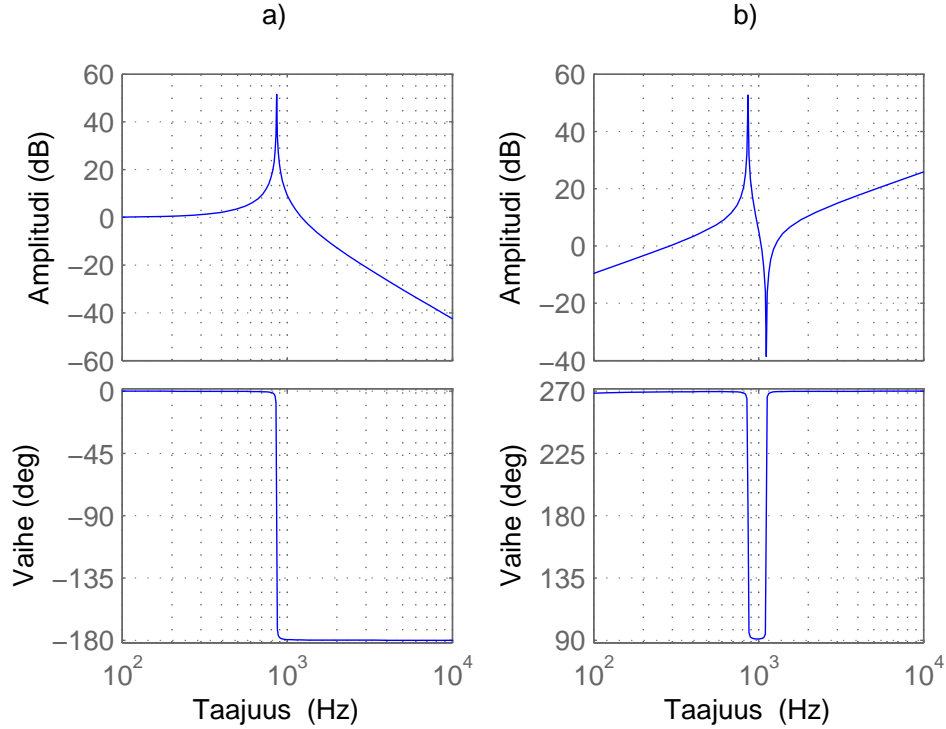
Näistä voidaan ratkaista siirtofunktiot suuntaajan jännitteen \underline{U}_1 ja kuormavirran \underline{I}_2 vaikutukselle lähtöjännitteeseen \underline{U}_2 .

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 \frac{1}{s^2 L_1 C + s R_1 C + 1} - \underline{I}_2 \frac{s^3 L_1 L_2 C + s^2 (L_2 R_1 C + L_1 R_2 C) + s (L_1 + L_2 + R_1 R_2 C) + R_1 + R_2}{s^2 L_1 C + s R_1 C + 1} \quad (13)$$

Siirtofunktioista voidaan piirtää kuvan 10 Boden diagrammit eräillä komponenttiarvoilla. Kuvassa on huomattava, että resonanssin vahvistus ei vastaa oikeaa, sillä todellisen kuristimen resistanssi kasvaa huomattavasti taajuuden funktiona. Kuvassa 10 a on suuntaajan jännitteen vaikutus lähtöjännitteeseen. Vasteessa on resonanssitaajuus 863 Hz:ssä, jonka yläpuolella vaimennus on 40 dB / dekad. Kuvan 7 perusteella suurimmat kytkentöjen aiheuttamat jännitekomponentit ovat taajuudesta 3,5 kHz alkaen. Vaimennus 3,5 kHz:stä ylöspäin on vähintään 23 dB, mikä riittää hyvään jännitteen laatuun.

Suodattimen resonanssi saattaa aiheuttaa ongelmia, koska DTC:n tuottamassa jännitteessä on komponentteja myös resonanssitaajuuden ympäristössä kuten kuvasta 7 voi nähdä.

Kuvassa 10 b on kuormavirran vaikutus lähtöjännitteeseen.



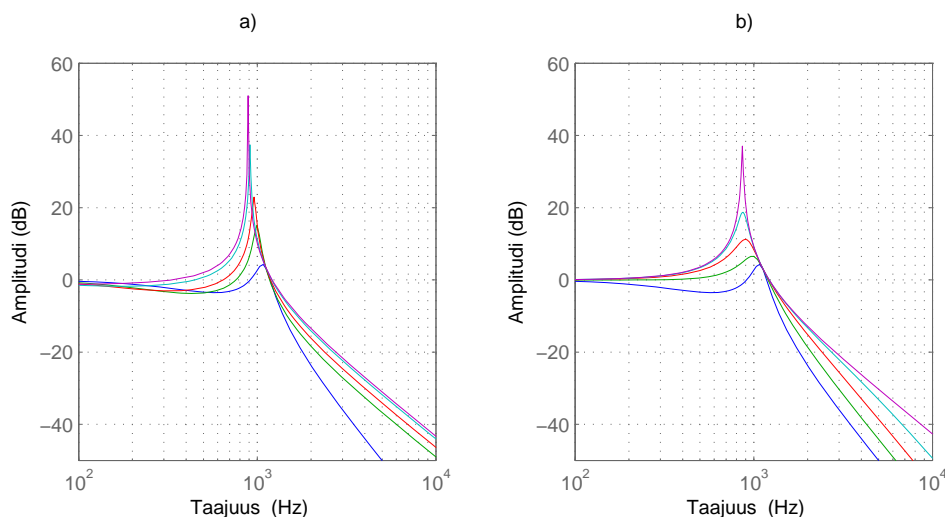
Kuva 10: Boden diagrammit suuntaajan jännitteestä (a) ja kuormavirrasta (b) lähtöjännitteeseen

Tutkitaan erilaisten kuormien vaikutusta lähtöjännitteeseen. Yleiset verkon kuormat ovat resistiivisiä tai jonkin verran induktiivisiä. Sijoitetaan suodattimen siirtofunktioon (13) kuorman siirtofunktio, joka on kuormaresistanssin R_L ja kuormainduktanssin L_L sarjaankytkennälle muotoa:

$$\underline{I}_2 = \underline{U}_2 \frac{1}{sL_L + R_L} \quad (14)$$

Kuvassa 11 on Boden amplitudidiagrammi suuntaajan jännitteestä lähtöjännitteeseen erilaisilla kuormilla. Kuvassa 11 a on 50 Hz:n impedanssin itseisarvoltaan 1Ω eri vaiheisia kuormia. Kuvassa 11 b on impedanssiltaan erilaisia resistiivisiä kuormia.

Nimellinen 1Ω :n resistiivinen kuorma vaimentaa suodattimen resonanssia tehokkaasti ja parantaa resonanssitaajuuden yläpuolella suodatusta 20 dB / dekadi verrattuna kuormittamattomaan suuntaajaan. Vähänkin induktiivinen kuorma heikentää resonanssin vaimennusta resistiiviseen kuormaan verrattuna ja estää kuorman puoleisen induktanssin L_2 positiivisen vaikutuksen suodatukseen. Täysin induktiivinen kuorma ei vaikuta vaimennukseen ollenkaan.



Kuva 11: Erilaisten kuormien vaikutus lähtöjännitteeseen, a) 50 Hz:n impedanssin itseisarvoltaan 1Ω eri vaiheisia kuormia, virta jännitettä jäljessä 50 Hz:llä 0 (sininen), 5 (vihreä), 10 (punainen), 30 (turkoosi) ja 90 astetta (violetti), b) impedanssiltaan eri arvoisia resistiivisiä kuormia, resistanssi 1 (sininen), 2 (vihreä), 4 (punainen), 10 (turkoosi) ja 100Ω (violetti) 50 Hz:llä

Myös impedanssin kasvattaminen resistiivisillä kuormilla vähentää vaimennusta, ja jo 4Ω kuormalla on selvä vahvistus resonanssitaajuudella.

2.4 Jännitteen säätö

Saarekekäytössä jännitesäädön tehtävänä on pitää standardien mukainen lähtöjännite suodattimen ja muuntajan jälkeisessä liitäntäpisteessä.

Kuvista 10 ja 11 nähdään, miten erilaiset lineaariset kuormat vaikuttavat lähtöjännitteeseen. Kuormien vaikutus lähtöjännitteeseen on suodattimen ja muuntajan suurehkon impedanssin takia niin suuri, että se on aktiivisesti kompensoitava. Suuntaajalle täytyy laskea jännite-ohje, joka kompensoi suodattimessa ja muuntajassa tapahtuvat jännitemuutokset.

Tyypillisiä sähköverkon kuormia ovat lineaariset resistiiviset kuormat kuten perinteinen valaistus ja lämmitys. Lisäksi verkossa on joitain osin induktiivisiä kuormia kuten oikosulkumootoreita. Näitä on pumpuissa, puhaltimissa ja monissa pyörivää liikettä käyttävissä koneissa. Tehoelektroniikan käytön lisääminen on tuonut verkkoon epälineaarisia kuormia, esimerkiksi dioditasasuuntaajia, joita on elektroniikan tehölähteissä ja ohjatuissa sähkömoottorikäytöissä.

Tasasuuntaajien ottamat virrat sisältävät normaalisti perustaajuuden lisäksi paritomia harmonisia. Tämän takia merkittävään jännitteen laadun parantamiseen riittää niiden tapauksessa tietyn taajuuksien harmonisten kompensointi.

Vaiheen ja nollan väliset ja kahden vaiheen väliset kuormat aiheuttavat vaiheiden

välillä epäsymmetrisiä jännitehäviöitä. Epäsymmetriaa kolmivaihejärjestelmässä voi kuvata positiivisella ja negatiivisella sekvenssillä.

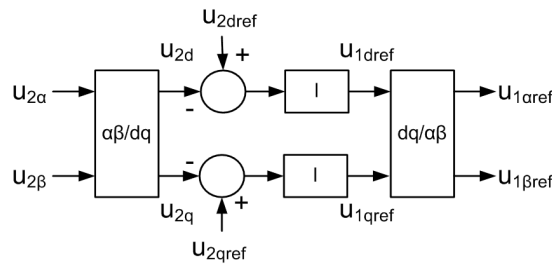
2.4.1 Kirjallisuudessa esitettyjä ratkaisuja

Jännitesäätöä on tutkittu UPS:ien ja sellaisten verkkoliitännäisten suuntaajien yhteydessä, jotka voivat toimia jännitelähteenä, jos verkon jännite katoaa.

Harmonisten jännitteiden säätö synkronisissa koordinaatistoissa

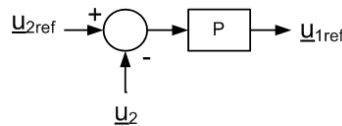
Viitteessä [9] ehdotetaan LC-suodattimella varustetun UPS:n säätömenetelmäksi synkronisissa koordinaatistoissa tapahtuvaa valitun taajuisten jännitteiden säätöä. Säädon todetaan sopivan monenlaisille muillekin suuntaaja- ja suodatintopologioille.

Menetelmässä säädettävien jännitekomponenttien positiiviset ja negatiiviset sekvenssit muutetaan vastaavalla nopeudella pyörivään koordinaatistoon, jolloin niitä voidaan säätää DC-suureina. Pyörivän koordinaatiston säätimet ovat integroivia, mikä estää tehokkaasti pysyvän tilan virheen. Kuvassa 12 on synkronisessa koordinaatistossa toimiva integroiva säädin. Säätimen todetaan vastaavan stationäärisen koordinaatiston resonanssisäädintä. [9]



Kuva 12: I-säädin synkronisessa koordinaatistossa

Pyörivän koordinaatiston säätimien rinnalla käytetään stationäärisessä koordinaatistossa toimivaa pelkästään vahvistavaa säädintä muutostilanteiden nopeaan hallintaan. Säädin on kuvassa 13. P-säädin toimii samalla tavalla synkronisessa koordinaatistossa, joten säätö kokonaisuutena vastaa stationäärisen koordinaatiston P+R-säädintä ja synkronisen koordinaatiston PI-säädintä.



Kuva 13: P-säädin jännitteelle

Mitattu jännite muunnetaan avaruusvektoriksi yhtälöiden (1), (2) ja (3) avulla. Vektori muunnetaan niihin synkronisiin koordinaatistoihin, joita vastaavia jännitekomponentteja halutaan säätää. Koordinaatistomuunnos tehdään yhtälön (5) avulla.

Negatiivista sekvenssiä vastaavaan koordinaatistoon siirrytään käyttämällä kulman vastalukua.

Säädettävien yliaaltojen määrää rajoittaa jännitevara, ja suurinta säädettävää taajuutta rajoittaa modulointitaajuuden ja näytteenottotaajuuden määräämä resoluutio ja suodattimen resonanssitaajuus. Jännitevara tarkoittaa, kuinka suuri pääjännite on tasajännitteestä mahdollista suunnata. Kompensointiin tarvittava pääjännite ei saa ylittää tasajännitettä.

Synkronisessa koordinaatistossa koordinaatistoa vastaavan taajuiset suureet siirtyvät taajuusalueessa tasakomponentiksi. Muun taajuisia komponentteja täytyy suodattaa merkittävästi, jotta ne eivät vaikuta säädettävään komponenttiin. Jos oletetaan, että merkittävät yliaallot ovat parittomia, on tasakomponentista seuraavan komponentin taajuus 100 Hz. Siten synkronisten koordinaatistojen suodatinten 100 Hz:n vaimennus on oltava niin suuri, että 100 Hz:n komponentti ei vaikuta säätimien. Hitaasti muttuville DC-suureille ei suodattimen nopeus ole oleellinen ominaisuus.

Suodatetut jännitteet viedään säätimille, joiden tehtävä on säätää nollaan kaikki komponentit paitsi perusaalto, joka säädetään saarekeverkon jänniteohjeeseen.

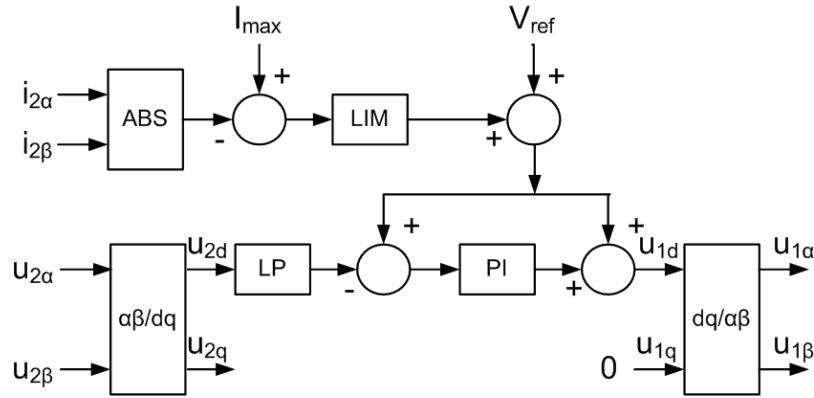
Jos käytetään virtamittausta, suositellaan suuntaajan virran säätöä. Siinä tapauksessa jännitesäädinten yhteenlaskettu ohje annettaisiin virtasäätimelle modulaattorin sijasta. Virtasäätimen laskema jänniteohje annettaisiin modulaattorille.

Jännitteen säätö synkronisessa koordinaatistossa ja virran rajoitus

Viitteessä [10] käsitellään säätömenetelmiä tuuliturbiinisuuntaajalle, joka voi syöttää tehoa valmiiseen verkkoon tai toimia verkon ainoana jännitelähteenä. Suuntaajassa on LCL-suodatin, joten ratkaisu on kuvan 9 mukainen.

Jännitteen säätöön ehdotetaan viitteessä kuvan 14 mukaista järjestelmää. Jännitettä säädetään perustaajuuteen nähden synkronisessa koordinaatistossa. Lisäksi vastetta ohjearvon muutoksiin nopeutetaan myötäkykennällä. Jännitteen vaihe on määritelty siten, että sen avaruusvektori on koordinaatistossa kokonaan d-akselin suuntainen. Mitatusta jännitteestä lasketaan vain d-suuntainen komponentti ja modulaattorin jänniteohjeessa käytetään vain d-suuntaista komponenttia. Tässä on ongelmana, että suodattimen aiheuttaman vaihesiirron takia verkon jännitteeseen syntyy myös q-komponenttia. Siten jännitteen amplitudi nousee hieman liian suureksi ja jännitteen vaihe kääntyy oletetusta. Tämän takia esitettyä säätömenetelmää ei voi käyttää, jos vaaditaan mahdollisimman hyvää suorituskkyä. [10]

Suuntaajan virta täytyy rajoittaa siten, että kytkimet eivät ylikuumene jatkuvasakaan kuormituksessa. Virran rajoitukseen ehdotetaan menetelmää, jossa virran avaruusvektorin pituutta verrataan määrättyyn maksimiarvoon. Jos virta ylittää rajan, lasketaan jännitteen perusaallon amplitudiohjetta virtasäätimellä. Säätimen ulostulo täytyy rajoittaa negatiivisiin arvoihin, koska virtarajoittimen ei ole tarkoitus nostaa jännitettä missään tilanteessa. Virtarajoitin on lohossa LIM kuvassa 14. [10]



Kuva 14: Jännitteen säätö synkronisessa koordinaatistossa ja virran rajoitus

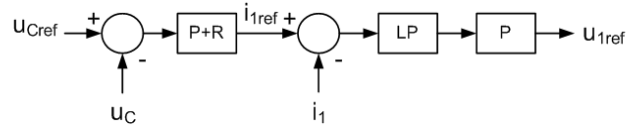
Virta on pääosin perustaaajuista, koska suurin osa kuormista on lineaarisia. Siten virtaa voi rajoittaa tehokkaasti pienentämällä jännitteen perusaallon amplitudia. Virran amplitudin rajoitus jännitteen amplitudia laskemalla voi kuitenkin olla ongelmallinen, jos verkossa on paljon energiaa varastoituneena esimerkiksi pyöriviin koneisiin. Jännitteen laskeminen aiheuttaa energian purkautumisen suuntaajan läpi, mikä saattaa vahingoittaa siltaa.

Jännite- ja virtasäätö sarjassa

Viitteessä [8] käsitellään säätömenetelmiä yksivaiheiselle suuntaajalle, joka voi toimia verkkoon liitettynä tai verkon ainoana jännitelähteenä.

Jännitelähdetilan säätömenetelmäksi ehdotetaan kahden silmukan säätöä, jossa säädetään suuntaajan virtaa i_1 ja sen avulla kapasitanssin jännitettä u_C kuvan 15 mukaisesti. Virtaa säädetään suuntaajan jännitteen u_1 avulla mitatun suuntaajan virran ja jännitesäätimeltä saadun ohjevirran perusteella. Säätimenä on pelkkä vahvistus alipäästösuodatuksella. Virtasilmukan tarkoitus on rajoittaa huippuvirtaa muutostilanteissa ja tasapainottaa jännitteen säätöä. Virtasäädössä lohko LP on alipäästösuodatus, jolla varmistetaan, että LCL-suodattimen resonanssitaajuudella ei synny herähteitä.

Kondensaattorin jännitettä u_C säädetään vastaavasti vahvistuksella ja resonanssisäätimellä mitatun jännitteen ja annetun jänniteohjeen perusteella. Resonanssisäätimellä saadaan suuri vahvistus jännitteen perustaaajuudelle, mikä vähentää jännitteen pysyvän tilan virhettä. Resonanssisäädin vastaa pyörivän koordinaatiston PI-säädintä. Kuorman liityntäpisteen ja kondensaattorin välissä on kuristin, jonka aiheuttaman jännitemuutoksen vaikutukseen kuormajännitteeseen tai vaikutuksen kompensointiin ei oteta kantaa. Viitteessä esitellään säätömenetelmä myös verkko-liitännäiseen tilaan, mutta tämän työn kannalta kiinnostava on vain jännitelähteenä toimivan suuntaajan säätö. [8]

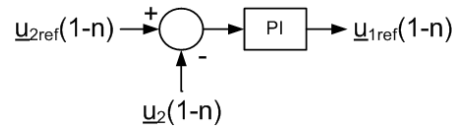


Kuva 15: Jännitesäätö ja virtasäätö sarjassa

Oma säädin jokaiselle jännitejakson näytteelle

Viitteessä [11] esitellään säätömenetelmä kolmivaiheiselle UPS-suuntaajalle. Laitteistoratkaisussa on kuristin ja muuntaja sarjassa suuntaajan lähdössä. Muuntajan toisiossa on tähteen kytketyt kondensaattorit. Siten säädön kannalta voi ajatella laitteiston toimivan normaalin LC-suodattimen tapaan. LC-suodattimen yksivaiheinen sijaistuskenttä on kuvassa 8.

Säädön periaate on kuvassa 16. Sen avulla on mahdollista kompensoida myös epälineaaristen ja epäsymmetristen kuormien suodattimessa ja muuntajassa aiheuttamat jännitemuutokset.



Kuva 16: Oma säädin jokaiselle jännitejakson näytteelle

Viitteen [11] säätöperiaatteessa lähtöjännitettä näytteistetään taajuudella, joka on kokonaisluvulla jaollinen jännitteen perustaajuuteen nähden. Koska verkkojännitteen puuttuessa perustaajuus määritellään suuntaajan ohjauksen oman kellon perusteella, on perustaajuus aina näytteenottotaajuuden moninkerta. Kolmivaihejärjestelmän jännitteet muutetaan avaruusvektoriksi ja alipäästösuodatetaan siten, että säädettävän taajuusalueen ulkopuolella olevat komponentit eivät vaikuta säätöön. Jokaiselle perusjakson aikaiselle näytteelle luodaan oma ohjevektori siten, että vektorien kärjet piirtävät yhdessä ympyränmuotoisen radan. Jännitevektoripohjaisen modulaattorin ohjevektorit lasketaan jokaiselle perusjakson näytteelle erikseen vastaavan näytevektorin ja ohjevektorin perusteella PI-säätimellä.

Viitteessä [11] esitettyjen mittausten perusteella menetelmä kompensoi kuormavirtojen aiheuttamat lähtöjännitteen muutokset niin hyvin, ettei kuvissa näy eroa toteutuneen jännitteen ja ohjearvon välillä. Koska säätö ei perustu suodattimen malliin, se voisi toimia myös LCL-suodatin-pohjaisessa saarekeverkkosuuntaajassa. Vaatimuksena on jänniteohjetta käyttävä modulaattori, mutta säädön voisi toteuttaa näennäisvuon avulla myös vuopohjaisessa modulaattorissa.

3 Simulaattori

Tehoelektroniikkasimuloinnissa on tiettyjä erityispiirteitä verrattuna yleiseen elektroniikkasimulointiin. Tehoelektroniikkapiireissä ei tyypillisesti ole kovin paljon komponentteja. Kytkimiä lukuun ottamatta komponentit ovat yleensä toiminnaltaan lineaarisia. Kytkimetkin voi mallintaa paloittain lineaarisina sijoittamalla integroimisaskelten rajat kytkentähetkille. Ottamalla nämä asiat huomioon suunnittelussa on mahdollista toteuttaa yleiskäyttöistä piirisimulaattoria huomattavasti nopeampi tehoelektroniikkasimulaattori. [12]

Tämän työn saarekekäyttösimulaattori on toteutettu valmiille pohjalle, joka mallintaa taajuusmuuttajalla syötetyn tuuliturbiinin. Pohja on tehty työnantajayrityksessä. Etuna kokonaan itse toteutetussa simulaattorissa kaupallisiin tuotteisiin verrattuna on edullisempi hinta ja täysi muokattavuus. Pohjaan kuuluu käyttöliittymä, joka sopii käytettäväksi sellaisenaan. Verkkovaihtosuuntaaja ja modulaattori ovat samanlaiset, joten niiden malleja ei tarvitse muuttaa. Toteutettavaksi jää suodattimen, muuntajan ja erilaisten kuormien mallit. Lisäksi suuntaajan säätöohjelma on muutettava saarekekäyttösovellusta vastaavaksi.

Simulaattori on suunniteltu ennen kaikkea säätökehitykseen, mikä vaikuttaa joihinkin ratkaisuihin. Tarkoituksena on tutkia suuntaajan toimintaa nimellisjännitteen ja nimellisvirran ympäristössä ja alapuolella, joten esimerkiksi suurista virroista saturoituva muuntajamalli on jätetty pois. Tärkeintä on toiminta perustaaajuudella, kompensoitavilla harmonisilla taajuuksilla ja suodattimen resonanssitaaajuudella.

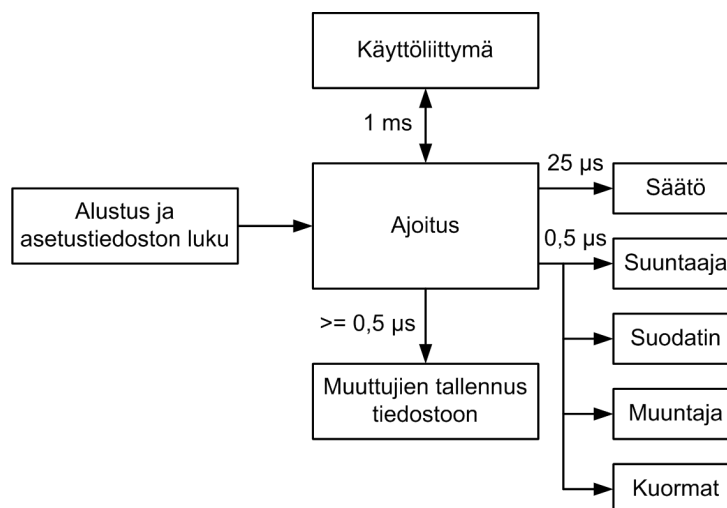
Tässä luvussa käsitellään ensin ohjelmaa, joka pyörittää käyttöliittymää ja simulointimalleja. Sen jälkeen tutkitaan eri osien malleja tarkemmin ja johdetaan mallien differentiaaliyhtälöt. Lopuksi valitaan sopiva menetelmä differentiaaliyhtälöiden ratkaisemista varten.

3.1 Ohjelma

Simulaattorin käyttöliittymä on toteutettu C++-kielellä. Simulointiosuus on tehty C-kielellä. Ohjelman rakenne on esitetty kuvassa 17. Kuvan aika-arvot ovat simulointiajassa. Ennen simulaatiota muuttujat alustetaan oletusarvoihin tai asetustiedoston mukaisesti. Simulaation aikana ajoitusfunktio suorittaa eri mallien funktioita ja summaa simulointiaikaa. Tehopiirin mallintavat funktiot suoritetaan $0,5 \mu\text{s}$:n välein ja säätöohjelma $25 \mu\text{s}$:n välein. Määrätyt muuttujat tallennetaan ulostulotiedostoon käyttäjän määrittelemän väliajoin. Tiedonsiirto käyttöliittymän ja simulointiohjelman välillä tapahtuu 1 ms :n välein. Ohjelman eri osat kommunikoivat keskenään globaalien muuttujien avulla.

3.1.1 Käyttöliittymä

Simulaation parametrit luetaan suorituksen alussa asetustiedostosta. Oleellimmat parametrit lisätään asetustiedostoon, jotta simulaation ajaminen eri parametreilla



Kuva 17: Simulaattoriohjelman lohkokkaavio

on mahdollista ilman ohjelman uudelleenkäännöstä. Tiedostosta voi asettaa suuntaajan, suodattimen, muuntajan ja kuormien parametrit.

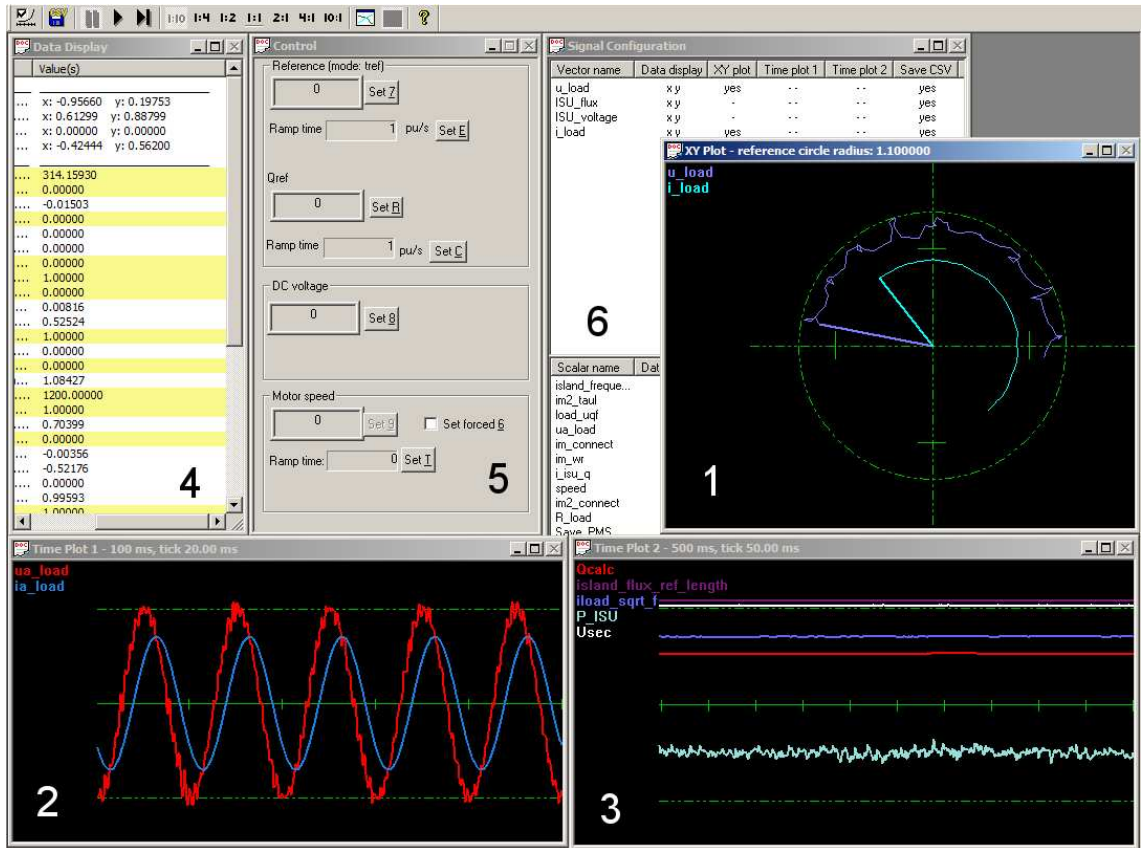
Simulaattorin ajonaikainen käyttöliittymä on esitetty kuvassa 18. Käyttöliittymässä on kolme grafiikkaikkunaa, kolme hallintaikkunaa ja painikerivi. Kuvassa 18 numeroilla 2 ja 3 merkityt ikkunat ovat skalaarimuotoisten signaalien tarkkailuun aikata-sossa ja ikkuna 1 on vektorisuureille. Hallintaikkunasta 4 voi ajon aikana tarkkailla signaalien numeerisia arvoja ja muuttaa joitakin parametreja kuten verkon kuormitusta ja jännitteen ohjearvoja. Ikkunassa 5 on ohjauspaneeli, josta voi kytkeä päälle kuormia. Ikkuna 6:sta voi muuttaa signaalien näkyvyyttä graafisissa näytöissä ja parametri-ikkunassa. Painikerivistä voi muuttaa simulaation suoritusnopeutta ja käyttöliittymän asetuksia. Ajon aikana on mahdollista tallentaa ennalta määrättyjä signaaleja csv-tyyppiseen tiedostoon.

3.2 Mallinnetut osat

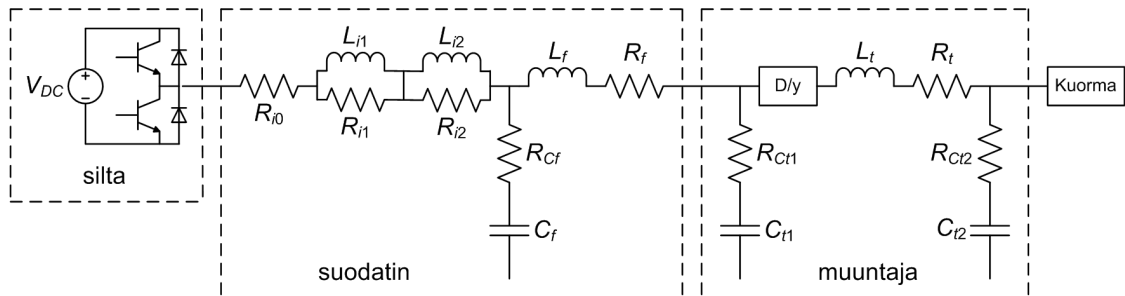
Kuvassa 19 on simulaattorissa käytetty sillan, suodattimen ja muuntajan sijaiskytkentä yksivaiheisena. R_i ja L_i -alkuiset komponentit kuuluvat suodattimen sillanpuoleisen kuristimen taajuusriippuvaan sijaiskytkentään, C_f ja R_{Cf} mallintavat suodatinkondensaattorin ja L_f ja R_f suodattimen kuormanpuoleisen kuristimen. Muuntajan mallissa C_t ja R_{Ct} -alkuiset komponentit mallintavat hajakapasitanssin ja ovat virtalähde-tyyppisten mallien rajapintana. L_t ja R_t ovat muuntajan oikosulkuresistanssi ja -induktanssi.

3.2.1 Silta

Tasajännitepiiri on mallinnettu vakiojännitelähteenä, koska työssä keskitytään vaihtosuuntaukseen. Kytkimet on mallinnettu ideaalisina, eli niissä ei ole jännitehäviötä



Kuva 18: Simulaattorin käyttöliittymä



Kuva 19: Saarekekäytön tehopiiriin simuloinnissa käytetty sijaiskytkentä yksivaiheisena

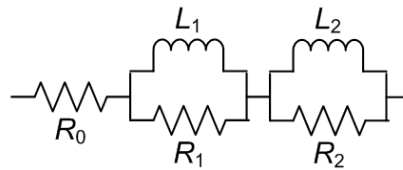
eikä viivettä. DTC:ssä kytkentöjä voi tapahtua vain silloin, kun uudet hystereesiveritailut tehdään, eli $25 \mu\text{s}$:n ja sen kokonaislukukerrannaisten välein. Siten kytkennät osuvat aina simulaattorin integroimisjaksojen väliin. Tämän takia ei ole tarpeen tutkia, tapahtuiko kytkentää integroimisjakson sisällä.

Sillan ohjaus pohjautuu viitteessä [7] esiteltyyn DTC:n skalaaritilaan. Synkronisten koordinaattien käyttö säädössä vastaa viitteessä [9] esitettyä ja virran rajoitus mukailee viitettä [10].

3.2.2 Suodatin

Kuvan 9 malli ei riitä LCL-suodattimen realistiseen mallintamiseen suurilla taajuuksilla. Todellisen kuristimen resistanssi kasvaa huomattavasti ja induktanssi pienenee hieman taajuuden funktiona. Tämä johtuu erityisesti kuristimen johtimissa syntyvistä pyörrevirroista. [13]

Kuristimen taajuusriippuvuuden mallintamiseen ehdotetaan Fosterin sijaiskytkentää [13]. Kuvassa 20 on sarjamuotoinen toisen asteen sijaiskytkentä. Kuvan mukaisessa sijaiskytkennässä on kaksi rajataajuutta, joten sijaiskytkennän kokonaisresistanssin ja -induktanssin voi sovittaa tarkasti kahdella eri taajuudella. Muilla taajuuksilla kokonais-komponenttiarvot ovat approksimaatioita. Pienillä taajuuksilla malli vastaa kuvan 9 suodatinmallissa käytettyä kuristinmallia, jossa on resistanssi ja induktanssi sarjassa.



Kuva 20: Kuristimen toisen asteen Foster-sijaiskytkentä

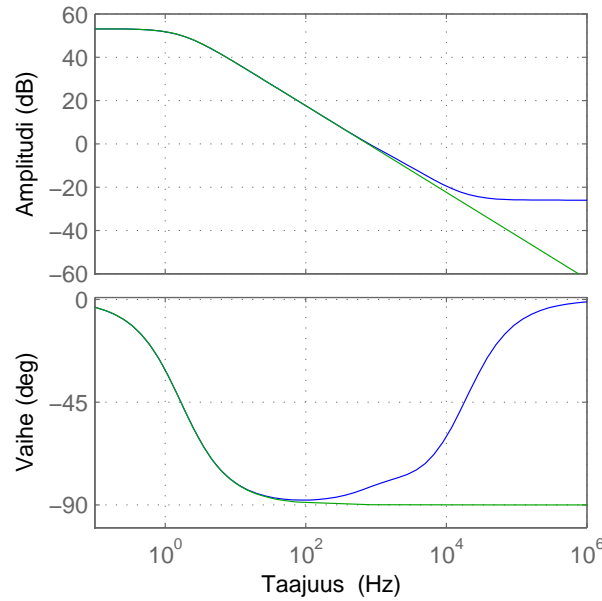
Tässä työssä sovitustaajuuksiksi on valittu perustaajuus 50 Hz ja suodattimen resonanssitaajuuden läheltä 1 kHz. Resonanssitaajuus on valittu sovitustaajuudeksi, koska resonanssi on sähkön laadun kannalta merkittävä tekijä DTC-pohjaisessa suuntaajassa.

Siirtofunktio kuvassa 20 esitetylle toisen asteen Fosterin sijaiskytkennälle kuristimen yli vaikuttavasta jännitteestä virtaan on

$$\frac{I}{U} = \frac{s^2 L_1 L_2 + s(L_1 R_2 + L_2 R_1) + R_1 R_2}{s^2 [L_1 L_2 (R_1 + R_2 + R_0)] + s(L_1 R_1 R_2 + L_2 R_1 R_2 + L_1 R_2 R_0 + L_2 R_1 R_0) + R_1 R_2 R_0} \quad (15)$$

Kuvaan 21 on piirretty siirtofunktioita (15) ja (10) vastaavat Boden diagrammit kuristimen yli vaikuttavasta jännitteestä virtaan. Pienillä taajuuksilla virta käyttäytyy molemmilla sijaiskytkennöillä samalla tavalla. Ensimmäisen sovitustaajuuden lähettyvillä virta alkaa siirtyä ensimmäisessä resistanssi-induktanssi-parissa enemmän resistanssille, koska induktiivisen haaran impedanssi kasvaa taajuuden funktiona. Samalla vaihesiirto alkaa kääntyä kohti resistiivistä. Toisen parin sovitustaajuudesta alkaen vaihe kääntyy jyrkemmin resistiiviseksi. Suurilla taajuuksilla kuristinmalli lähestyy täysin resistiivistä. Suurempi resistanssi vaimentaa huomattavasti korkeataajuisia ilmiöitä kuten suodattimen resonanssia.

Tätä simulaattoria toteutettaessa ei ole ollut käytettävissä tarkkoja kuristimen impedansseja eri taajuuksilla, joten impedanssit sovitustaajuuksilla on arvioitu vastaavanlaisen kuristimen jännite- ja virtamittauksesta. Impedanssiarvot skaalataan



Kuva 21: Boden diagrammi jännitteestä virtaan Foster-sijaiskytkennällä (sininen) ja resistanssin ja induktanssin sarjaankytkennällä (vihreä)

kuristimen perustaajuisen induktanssin mukaan. Ilman tarkempaa tietoa resonanssitaajuuden impedanssista ei simulaattorilla voi arvioida resonanssitaajuisia ilmiöitä kuin suuntaa-antavasti.

Suodatinkondensaattorit ja hajakapasitanssit on mallinnettu kapasitansseina, jossa on pieni vaimennusresistanssi sarjassa. Siirtofunktio kondensaattorin virrasta jännitteeseen on

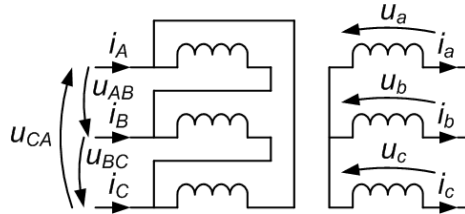
$$\underline{U}_C = \underline{I}_C \frac{1}{sC + R_C} \quad (16)$$

3.2.3 Muuntaja

Muuntajamallissa on kolmio-tähti-muunnos ja oikosulkuimpedanssi. Muuntajan käämitys on kuvan 22 mukainen. Käämityssuhde on $1/3$. Kolmio-tähti-muunnosta varren kuvasta 22 voidaan ratkaista yhtälöt jännitteelle ja virralle.

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{1}{3} u_{AB} \\ u_b &= \frac{1}{3} u_{BC} \\ u_c &= \frac{1}{3} u_{CA} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
i_A &= 3(i_a - i_c) \\
i_B &= 3(i_b - i_a) \\
i_C &= 3(i_c - i_b)
\end{aligned} \tag{18}$$



Kuva 22: Muuntajan kolmio-tähti-kytkentä

Muuntajamallin tavoitteena on mallintaa jännitehäviöt perustaaajuudella ja kompensoitavilla harmonisilla taajuuksilla. Siksi muuntajan jännitehäviön mallintamiseen riittää oikosulkuimpedanssi.

Oikosulkuimpedanssi on sijoitettu kokonaan toisiopuolelle kuvan 19 mukaisesti (L_t ja R_t), koska yhtälöllä (17) saa ratkaistua toisiopuolen jännitteen ja yhtälö (18) tarvitsee toisiovirran. Virran oikosulkuimpedanssin läpi voi silloin laskea jännitteestä integroimalla.

3.2.4 Kuormat

Luvussa 2 todettiin yleisimpien sähköverkon kuormien olevan lineaarisia resistiivisiä tai induktiivisia, oikosulkumoottoreita ja epälineaarisia suuntaajia. Saarekekäytössä säädön tarkoitus on kompensoida näidentyyppisten kuormien vaikutus lähtöjännitteeseen, joten niiden mallintaminen riittää kaikkien säätöominaisuuksien testaamiseen.

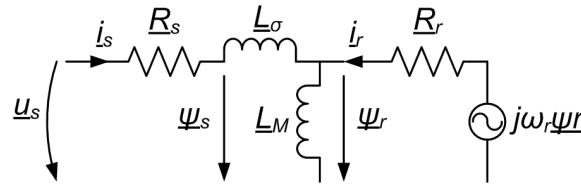
Resistiivinen ja induktiivinen kuorma

Simulaattorissa on mahdollista kuormittaa jokaista vaihetta erikseen resistanssin ja induktanssin sarjaankytkennällä. Tämän avulla voi simuloida monenlaisia tilanteita, kuten resistiivistä ja induktiivista kuormitusta, epäsymmetristä kuormitusta ja oikosulkuja. Kahden vaiheen välistä kuormaa ei kuitenkaan tämän työn yhteydessä toteutettu. Virran ratkaisuun resistanssin ja induktanssin sarjaankytkennän läpi käytetään siirtofunktiota (14).

Suoraan verkkoon kytketty kone

Oikosulkukoneen mallintamiseen on käytetty käänteis- Γ -sijaiskytkentää, joka on esitetty kuvassa 23. Kääntäis- Γ -sijaiskytkentä perustuu yleiseen oikosulkumoottorin

malliin. Oikosulkumoottorin staattorivirta jännitteen funktiona on toisen asteen järjestelmä, joten yleisestä T-mallista on mahdollista redusoida yksi induktanssi ilman, että virran käytös muuttuu. [14]



Kuva 23: Oikosulkumoottorin kääteis- Γ -sijaiskytkentä

Ratkaistaan kuvasta 23 yhtälöt koneen voille ja virroille.

$$\underline{\Psi}_s = \int (\underline{u}_s - R_s \underline{i}_s) dt \quad (19)$$

$$\underline{\Psi}_r = \int (-R_r \underline{i}_r + j\omega_r \underline{\Psi}_r) dt \quad (20)$$

$$\underline{i}_s = \frac{1}{L_\sigma} (\underline{\Psi}_s - \underline{\Psi}_r) \quad (21)$$

$$\underline{i}_r = \frac{1}{L_M} \underline{\Psi}_r - \underline{i}_s \quad (22)$$

Lisäksi käytetään kulmanopeuden ω_r laskemiseen yleistä momentin yhtälöä 23 ja liikeyhtälöä 24, joissa p on koneen napapariluku, J on koneen hitausmomentti, τ_e on koneen tuottama momentti ja τ_l on kuormamomentti.

$$\tau_e = \frac{3}{2} p \text{Im}(\underline{\Psi}_r^* \underline{i}_s) \quad (23)$$

$$\omega_r = \int \left(\frac{p}{J} (\tau_e - \tau_l) \right) dt \quad (24)$$

Epälineaarinen kuorma

Epälineaarinen kuorma on mallinnettu virtalähteenä. Säättökehityksen kannalta tärkeintä ei ole tarkka diodisillan toiminnan mallintaminen, vaan saada aikaan joidenkin yliaaltovirtojen vaikutus verkon jännitteeseen ja sitten tutkia niiden kompensoinnin toimintaa.

Virtalähteen kulma synkronoidaan verkon jännitteeseen vaihelukitun silmukan avulla. Virtalähteelle annetaan käynnistyksessä jännitteen sen hetkinen kulma. Kulmaa muutetaan jatkuvasti perustaajuutta vastaavalla nopeudella, ja sen lisäksi sitä verrataan jännitteen kulmaan ja ohjataan hitaasti virhettä vastakkaiseen suuntaan.

Yliaallot generoidaan käyttäen ennalta määrättyjä amplitudeja ja vaihe-eroja jännitteeseen nähden.

3.3 Differentiaaliyhtälöiden ratkaiseminen

Differentiaaliyhtälöinä esitettyjen mallien ratkaisemiseen tarvitaan numeerinen menetelmä.

3.3.1 Ratkaisumenetelmiä

Menetelmien kehityksessä lähdetään yleensä liikkeelle differentiaaliyhtälöä vastaavasta integraaliyhtälöstä, joka on muotoa:

$$y = y_0 + \int x \, dt \quad (25)$$

Yleensä ratkaisumenetelmissä approksimoidaan yhtälön (25) integraalia [15]. Tämän takia tutkitaan muutamaa numeerista integrointimenetelmää.

Riemannin summa

Geometrisesti ajatellen Riemannin summassa integraalia approksimoidaan suorakaiteena. Vaihtoehtoina on käyttää suorakaiteen korkeutena funktion arvoa sen vasemmassa tai oikeassa reunassa. Rekursiivisessa muodossa niiden yhtälöt ovat seuraavanlaiset, kun h on integroimisaskel. [16]

$$y_n = y_{n-1} + hx_{n-1} \quad (26)$$

$$y_n = y_{n-1} + hx_n \quad (27)$$

Riemannin summan virhe on suurin esitellyistä menetelmistä, mutta lyhentämällä integroimisaskelta lähestyy tulos integraalin tarkkaa arvoa.

Puolisuunnikasmenetelmä

Puolisuunnikasmenetelmä on vasemman ja oikean puoleisen Riemannin summan keskiarvo. Geometrisesti menetelmä vastaa pinta-alan approksimoimista puolisuunnikkaalla. [16]

$$y_n = y_{n-1} + \frac{h}{2}(x_n + x_{n-1}) \quad (28)$$

Puolisuunnikasmenetelmällä saisi hieman Riemannin summaa tarkemman arvon simulaattorissa laskentanopeuden kustannuksella.

Simpsonin sääntö

Simpsonin säännössä integroitavaa funktiota approksimoidaan toisen asteen polynomilla [16]. Simpsonin sääntö voidaan johtaa suositusta neljännen asteen Runge-Kutta-menetelmästä, jota käytetään differentiaaliyhtälöiden seuraavien arvojen approksimointiin [15].

$$y_n = y_{n-1} + \frac{h}{6}(x_{n-1} + 4x_{n-\frac{1}{2}} + x_n) \quad (29)$$

Simpsonin sääntö on tarpeettoman monimutkainen simulaattoriin, sillä integroitavien suureiden arvoista ei ole tietoa laskentapisteen välissä. Ainoastaan yliaalto-lähteen integraali olisi tarkempi tällä menetelmällä.

3.3.2 Virhearvio

Numeerisen integroinnin virhe koostuu katkaisuvirheestä ja pyöristysvirheestä. Katkaisuvirhe riippuu käytetyn integraalin approksimaation kertaluvusta. Esimerkiksi Riemannin summan virhe on verrannollinen askelpituuden neliöön. Pyöristysvirhe riippuu laskennassa käytettävän lukuesityksen tarkkuudesta. Pyöristysvirhe kasvaa askelpituuden pienentyessä, koska pyöristyksiä täytyy silloin tehdä enemmän ja pienemmillä luvuilla. Kokonaisvirheen arviointi on haasteellista. Virheestä voi antaa vain johonkin paikalliseen virheeseen perustuvia arvioita. [15]

3.3.3 Valittu menetelmä

Simulaattorissa käytetään vakiomittaista integrointiaskelta. Laskentataajuus on 2 MHz, jolloin laskenta-askel h on $0,5 \mu\text{s}$. Siirtofunktiot on diskretoitu käyttämällä derivaatan approksimaationa taaksepäin derivointia, mikä vastaa oikeanpuoleista Riemannin summaa. Integrointiin on valittu kevyt menetelmä, koska integrointiaskel on huomattavan pieni verrattuna suurimpiin simulaattorissa esiintyviin taajuuksiin. Esimerkiksi vielä resonanssitaajuuksella yhteen jaksoon mahtuu yli 2000 simulointiaskelta.

Diskreettiaikainen siirtofunktio lasketaan sijoittamalla Laplacen operaattorin tilalle derivaatan diskreettiaikainen approksimaatio, jossa z on kompleksiluku.

$$s = \frac{z - 1}{hz} \quad (30)$$

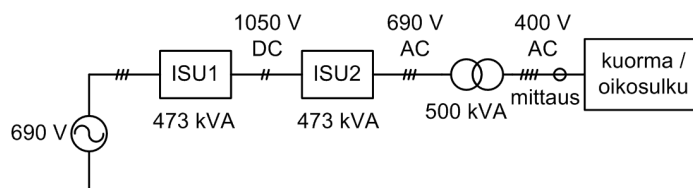
4 Simuloinnit ja vertailumittaukset

Tässä luvussa verrataan simulaattorin toimintaa vastaavaan prototyypilaitteeseen. Testeissä verifioidaan simulaattorin toiminta tyhjäkäynnillä, epälineaarisella kuormalla, epäsymmetrisellä kuormalla ja virranrajoitustilanteessa.

4.1 Vertailumittausten testijärjestely

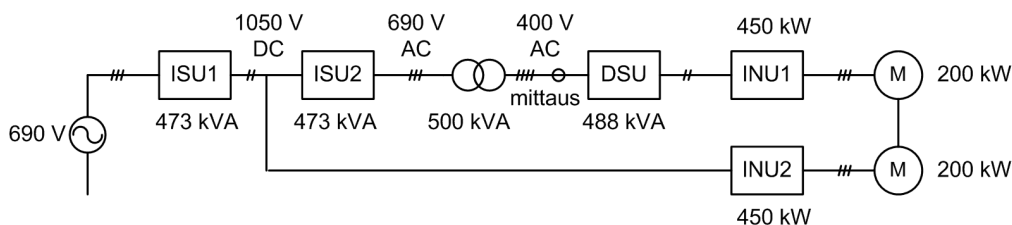
Testijärjestely on esitetty kuvassa 24. Tasajännitelähteenä on aktiivinen nimellisteho 473 kVA:n kolmivaiheinen suuntaaja ISU1. Tasajännite on säädetty, joten se pysyy lähellä ohjearvoa. Simulaattorissa tasajännite on oletettu täysin vakioksi. Vaihtosuuntauksen kannalta muutaman voltin vaihtelulla ei kuitenkaan ole suurta merkitystä, koska työn painopiste ei ole moduloinnissa. Saarekeverkon jännite tuotetaan 473 kVA:n kolmivaiheisella suuntaajalla ISU2, johon kuuluu LCL-suodatin ja 500 kVA:n Dyn11-muuntaja.

Epäsymmetrisen kuormituksen testaamiseen käytetään 1,7 mH:n kuristinta. Kuristin kytketään muuntajan toisioon vaiheen L1 ja tähtipisteen väliin. Oikosulkukoe tehdään samanlaisella kytkennällä, paitsi että kuristimen sijasta vaiheen ja nollan väliin kytketään johdin.



Kuva 24: Mittausjärjestely kuristinkuormalla ja oikosulussa

Epälineaarisen kuorman mittausjärjestely on kuvassa 25. Epälineaarista kuormitusta varten on 488 kVA:n diodisilta DSU. Diodisiltaa kuormitetaan 450 kW:n vaihtosuuntaajalla INU1, joka syöttää 200 kW:n oikosulkukonetta. Koneen vastamomentti tuotetaan toisella samanlaisella kone-suuntaaja-yhdistelmällä, joka saa tasajännitteen saarekeverkkosuuntaajan tasajännitepiiristä.



Kuva 25: Mittausjärjestely epälineaarisella kuormalla

Kaksi saarekeverkon jännitettä ja kaksi vaihevirtaa mitataan muuntajan toisiosta Yokogawa-tehoanalysaattorilla. Kolmas jännite ja virta lasketaan kahdesta muusta.

Epäsymmetrisesti kuormitettaessa kolmatta jännitettä ja virtaa ei voida tällä mitausjärjestelyllä laskea tarkalleen, koska nollajohtimen jännitehäviöstä ja virrasta ei ole tietoa.

Mittaukset ja simuloinnit on näytteistetty 100 kHz:n taajuudella lukuunottamatta oikosulkua, joka on mitattu 5 kHz:n taajuudella. Fourier-muunnokset on laskettu viiden jännitejakson näytejonoista.

4.2 Simulaatiot ja mittaukset

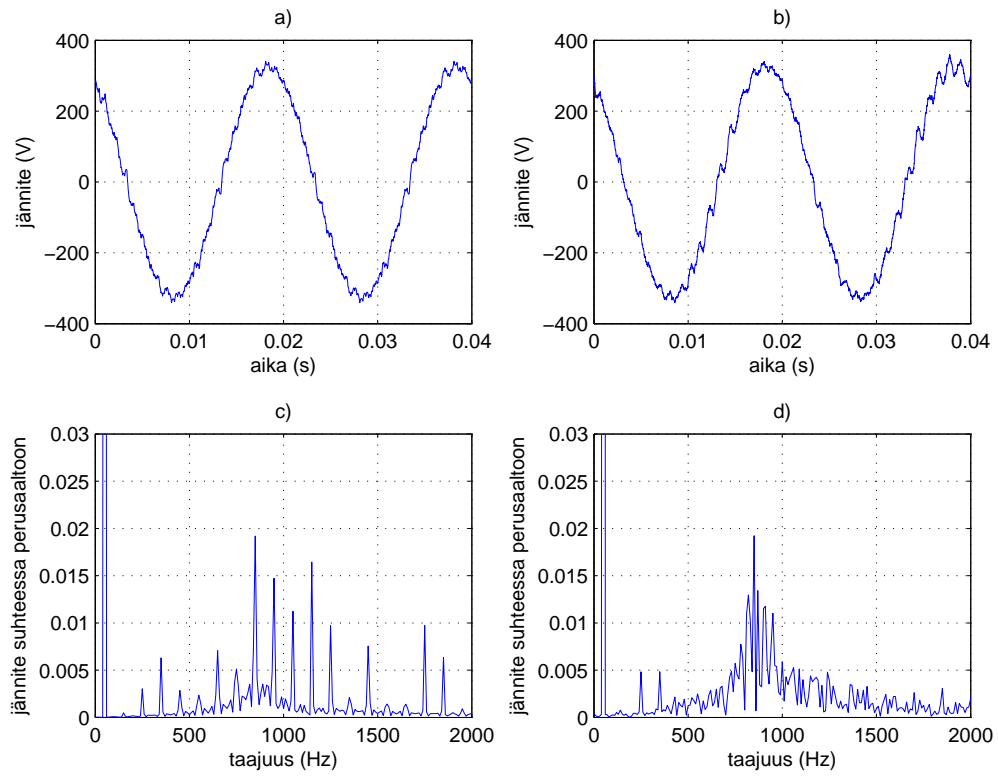
4.2.1 Tyhjäkäyntijännite

Tyhjäkäyntitestissä verrataan prototyypin tuottamaa ja simuloitua saarekeverkon tyhjäkäyntijännitettä. Kuvassa 26 on vaihejännite L1 ja sen spektri simuloituna ja mitattuna.

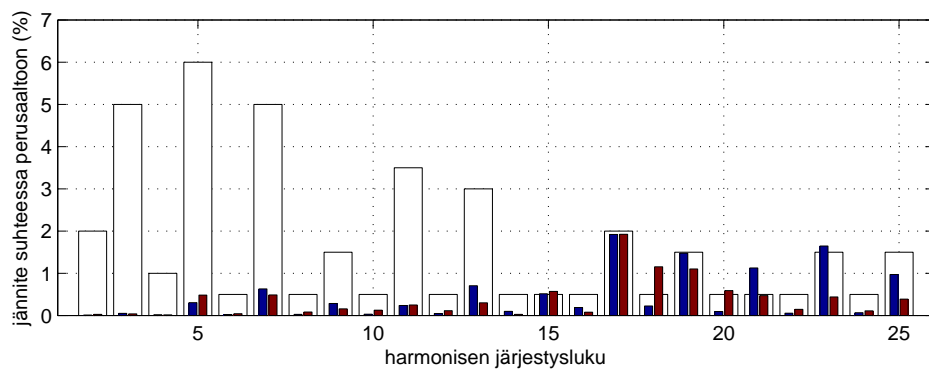
Jännitteen laatua ei voi verrata kuvien perusteella kuin suuntaa antavasti, koska DTC:n satunnaisuudesta johtuen suuntaaja tuottaa erilaisen jännitepulsikuvion eri testeissä, ja siten värähtely on aina erilainen. Kuvista 26 c ja d nähdään kuitenkin, että molemmissa on perustaajuuden lisäksi suurimmat jännitekomponentit aiemmin arvioidun 850 Hz:n resonanssitaajuuden ympäristössä. Simulaattorissa spektri on jakautunut tietyille taajuuksille, mutta prototyypissä se on jakautunut tasaisemmin. Tämä johtunee simulaattorissa käytetystä ideaalisesta sillan mallista. Simulaattoripohjan valmista modulaattorin mallia ei ole tässä työssä käyty läpi, joten sen samankaltaisuuten ei voi ottaa kantaa. Tämän eroavaisuuden takia on oltava erityisen varovainen tutkittaessa simulaattorin jännitettä taajuustasossa.

Kuvassa 27 on vaihejännitteen L1 harmoniset ja standardin asettamat rajat niille. Harmonisten rajat alittuvat selkeästi lukuunottamatta resonanssitaajuuden ympäristöä, jossa rajat ylittyvät paikoin. Simulaattorissa korostuvat parittomat harmoniset, kuten spektrikuvastakin huomattiin. Standardissa määrätty raja ylittyy 18. harmonisella prototyypin tuottamassa jännitteessä. Tätä on vaikea välttää, koska parillisten harmonisten rajat ovat erityisen tiukat, ja resonanssitaajuuden ympäristössä olevat harmoniset korostuvat välttämättä.

Jännitteen THD, joka on laskettu yhtälön 8 avulla 40. harmoniseen asti, on simulaattorissa 3,78 % ja prototyypissä 2,96 %. Tässä tapauksessa THD ei anna täysin oikeaa kuvaa jännitteen laadusta, koska prototyypin tuottamassa jännitteessä on huomattavasti myös harmonisten välisiä komponentteja.



Kuva 26: Saarekeverkon vaihejännite tyhjäkäynnissä ja sen spektri, a ja c simuloitu, b ja d mitattu



Kuva 27: Saarekeverkon vaihejännitteen harmoniset komponentit tyhjäkäynnissä, sininen simuloitu, punainen mitattu, valkoinen standardin asettamat rajat

4.2.2 Epäsymmetrinen kuorma

Epäsymmetrisen kuorman testissä saarekeverkon kuormana on 1,7 mH:n kuristin vaiheen L1 ja muuntajan tähtipisteen välillä. Kokeessa selvitetään, miten epäsymmetrinen kuorma vaikuttaa saarekeverkon jännitteisiin simulaattorissa ja prototyypissä. Lisäksi vertaillaan, toimiiko jännitesäätö samalla tavalla molemmissa.

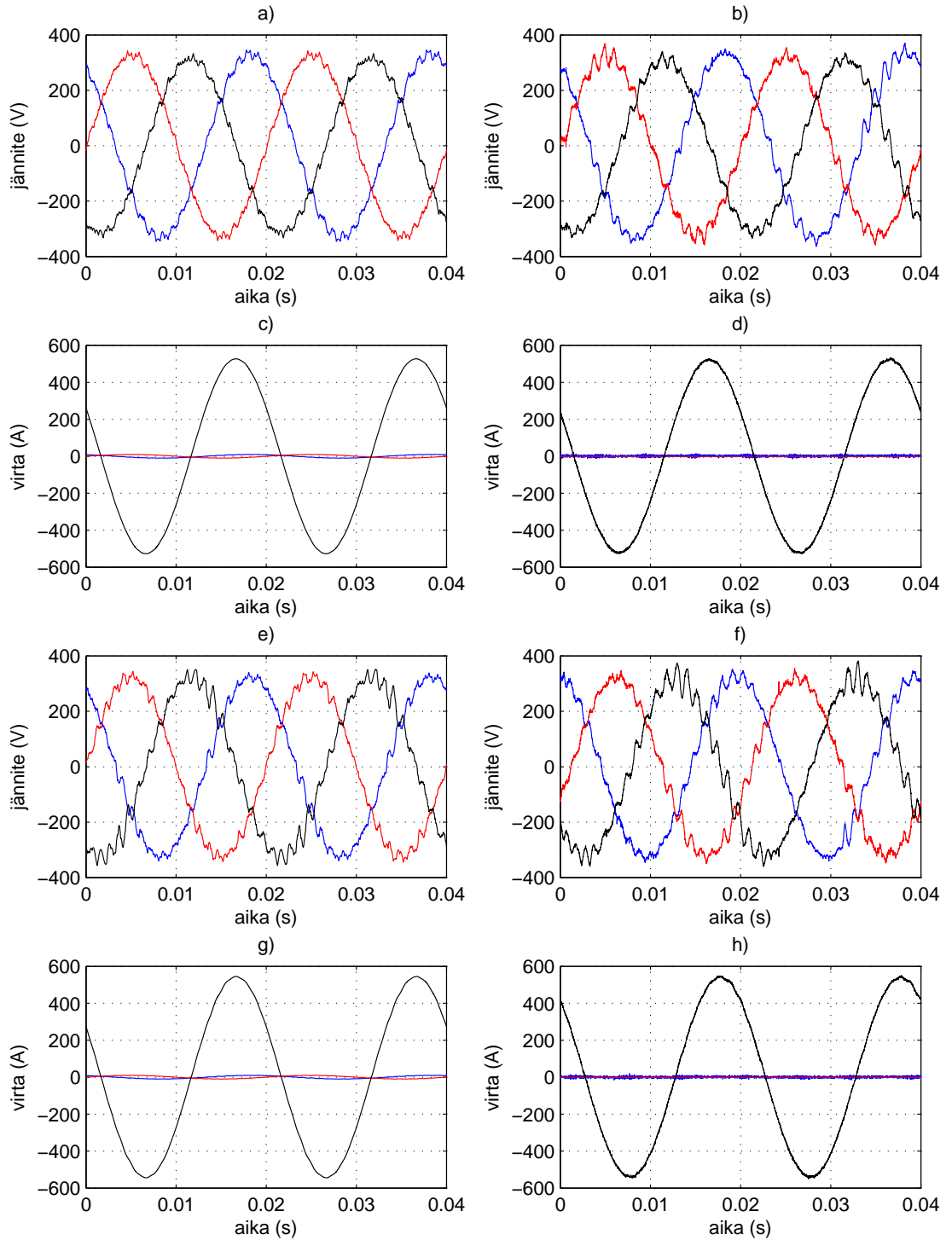
Simuloinneissa on kuormittamattomissa vaiheissa suuri-impedanssiset vastukset, joiden läpi kulkee 1 % nimellisvirrasta. Tämä johtuu siitä, että kuorman mallissa kaikki vaihekuormat kytketään verkkoon samanaikaisesti, jolloin kaikille vaiheille on asetettava jonkinlaiset komponenttiarvot. Tässä simulaatiossa ei muiden vaiheiden kevyt kuormittaminen aiheuta tarkastelutarkkuuden kannalta merkittävää muutosta vaihejännitteisiin.

Kuvassa 28 on saarekeverkon vaihejännitteet ja kuormavirrat epäsymmetrisellä kuormituksella ilman kompensointia ja kompensoituna. Taulukossa 2 on kuvien jännitteistä lasketut tehollisarvon keskiarvot. Lisäksi käyttäen yhtälöä 7 on laskettu arvot jännite-epäsymmetrialle eri tilanteissa.

Taulukko 2: Jännitteiden tehollisarvot ja vastakomponentin suuruus suhteessa myötäkomponenttiin epäsymmetrisellä kuormalla

vaihe	L1	L2	L3	epäsymmetria
simuloitu, ei kompensoitu	234 V	231 V	222 V	3,00 %
mitattu, ei kompensoitu	238 V	228 V	220 V	4,54 %
simuloitu, kompensoitu	229 V	229 V	229 V	0,00 %
mitattu, kompensoitu	231 V	227 V	228 V	1,24 %

Epäsymmetrinen kuorma aiheuttaa simulaattorissa 1,5 prosenttiyksikköä pienemmän epäsymmetrian. Simulaattorin muuntajan 50 Hz:n impedanssissa lienee eroa todelliseen. Tätä voisi tarkentaa käyttämällä mitattuja muuntajan parametreja. Kompensoinnin ollessa päällä simulaattorissa on reilun prosenttiyksikön pienempi epäsymmetria. Simulaattorilla on pienempi epäsymmetria kompensoitavana, joten simulaattorin kompensoiduissa jännitteissä voikin olettaa olevan pienempi epäsymmetria prototyyppiin verrattuna. Kummassakin tapauksessa epäsymmetrian kompensointi parantaa merkittävästi jännitteen laatua.



Kuva 28: Epäsymmetrinen kuorma, vaihejännitteet ja vaihevirrat, a, c, e ja g simuloitu, b, d, f ja h mitattu, a-d jännite-epäsymmetria ei kompensoitu, e-h jännite-epäsymmetria kompensoitu

4.2.3 Epälineaarinen kuorma

Diodisillalla kuormitettaessa tutkitaan, miten harmoniset virrat vaikuttavat jännitemuotoon ja kuinka hyvin jänniteyلياaltojen kompensointi toimii. Simuloitu kuormavirta sisältää perustaajuisen komponentin lisäksi neljä harmonista komponenttia. Harmoniset komponentit sisältävät viidennen, seitsemännen, yhdeksännen ja kolmannentoista yliaallon. Niiden amplitudit suhteessa perusaaltoon on arvioitu vastaavien mitattujen kuormavirtojen Fourier-muunnoksista. Suhteelliset amplitudit on esitetty taulukossa 3. Tehokertoimeksi on arvioitu 0,84 ja harmonisten virtojen vaihesiirrot perusaaltoon nähden ovat 180 astetta. Todellisen diodisillan yliaalloilla vaihesiirto poikkeaa tästä hieman, mikä saattaa aiheuttaa pientä eroa virta- ja jännitemuodoissa.

Taulukko 3: Kuormavirran harmonisten komponenttien arvot suhteessa perusaaltoon

järjestysluku	5	7	11	13
ei kompensoitu	24 %	7,1 %	5,2 %	4,3 %
kompensoitu	41 %	16 %	8,5 %	2,0 %

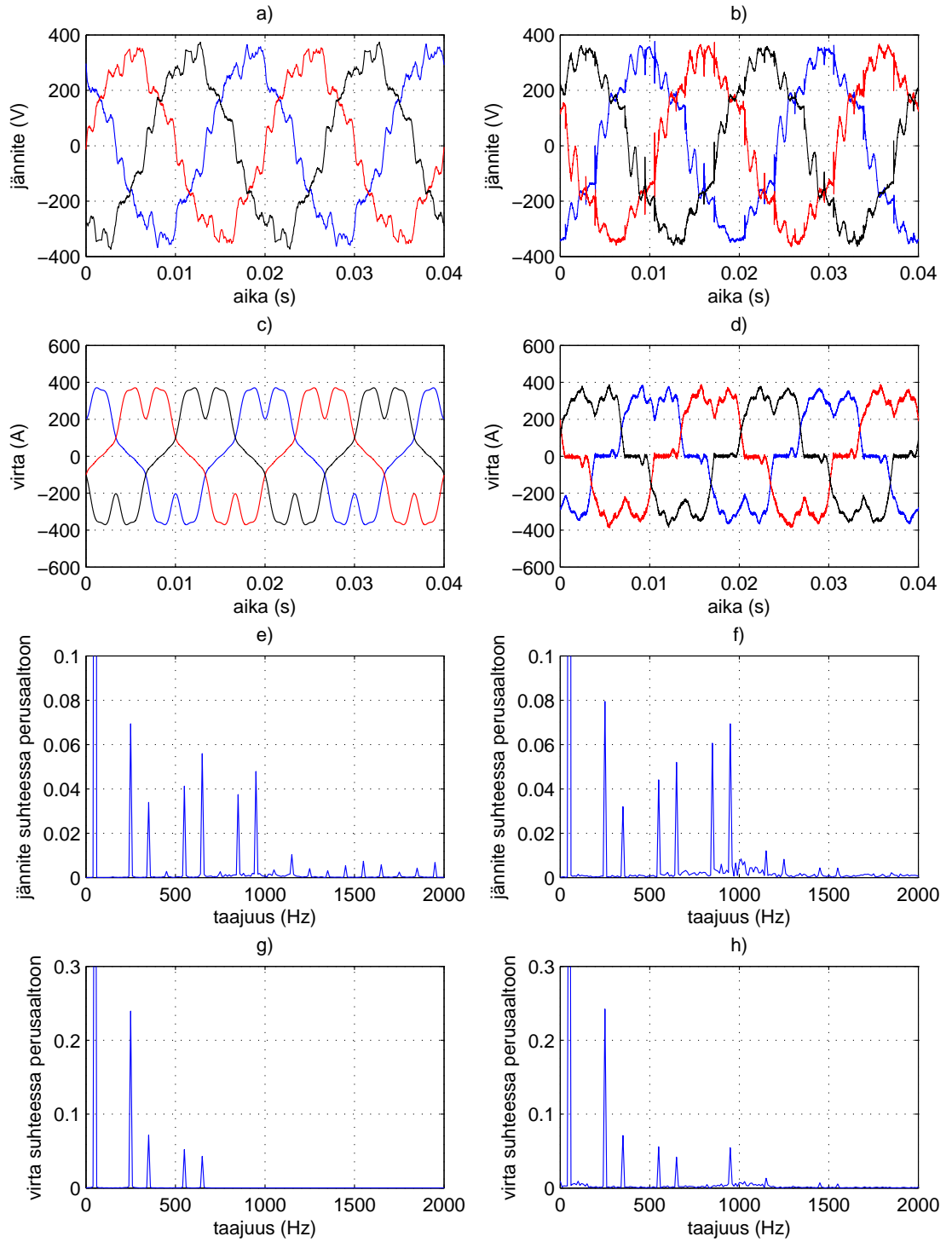
Kuvissa 29 ja 30 on saarekeverkon vaihejännitteet, vaihevirratt ja vaiheen L1 jännitteiden ja virtojen spektrit. Kuvien 29 ja 30 kohtien c ja d perusteella simuloinnissa käytetyt virrat ovat perusmuodoltaan samankaltaiset kuin mitatut, mutta kuitenkin selvästi yksinkertaistetut vähäisen yliaaltokomponenttien määrän takia. Erot kuvien 29 ja 30 virtojen välillä johtuvat siitä, että harmonisten kompensoinnin jälkeen virran tuottava jännite on eri muotoinen.

Jännitekuvien 29 a ja b perusteella jännite muuttuu simulaattorissa hieman eri tavalla, koska kuormavirrassa ei ole yhtä paljon harmonisia komponentteja. Jännitteen spektrikuvan perusteella kuormavirtojen vaikutus jännitteeseen on samankaltainen simulaattorissa ja prototyypissä. Resonanssitaaajuuden ympäristössä olevissa harmonisissa on merkittävästi eroa erityisesti kuvassa 30, mikä johtunee siitä, että simulaattorin kuormavirrassa ei ole resonanssitaaajuisia komponentteja, eikä siten niiden vaikutusta jännitteeseen.

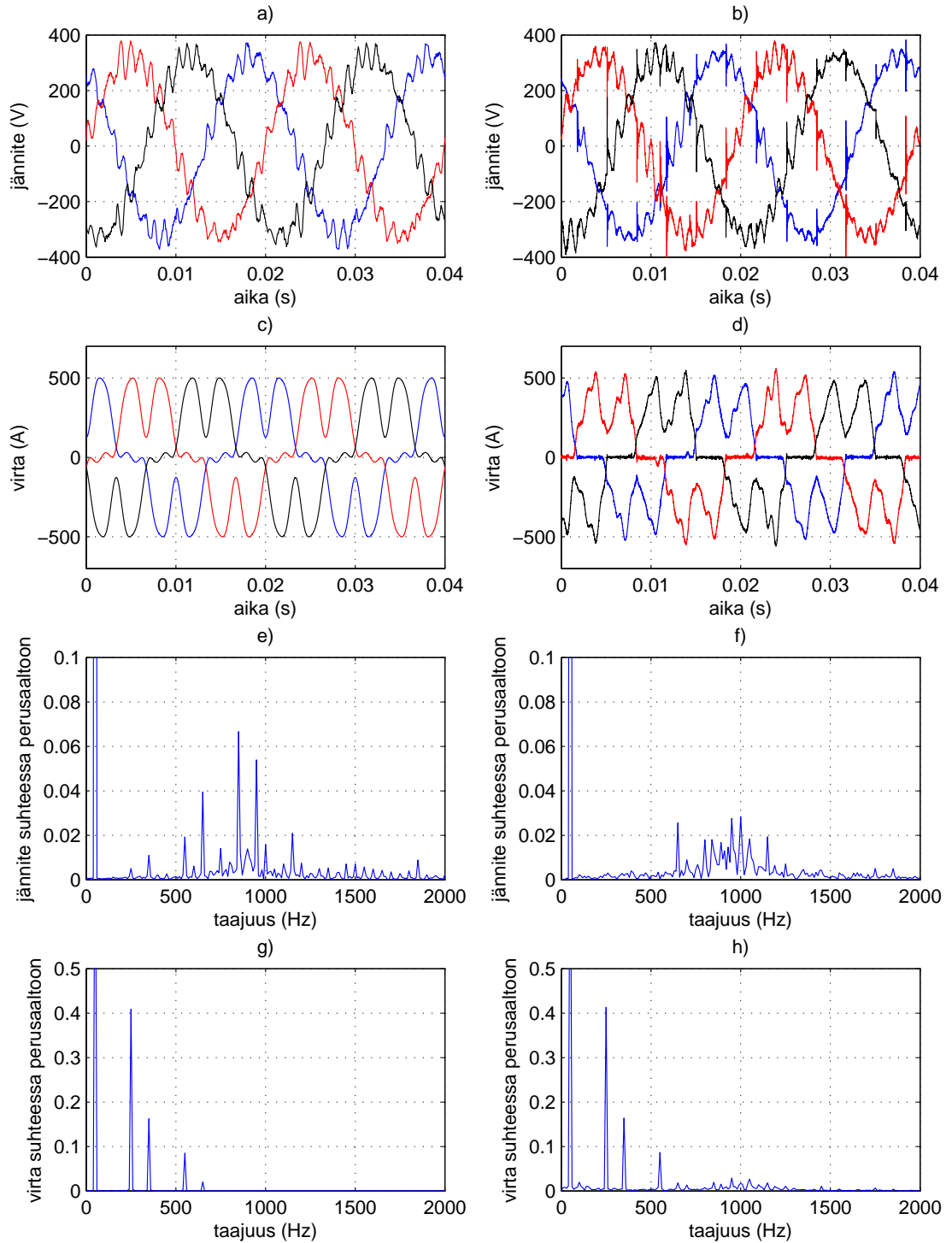
Tässäkin kokeessa on jonkin verran eroja jänniteharmonisten amplitudeissa, koska simulaattorissa varsinkin muuntajan impedanssi ei ole täysin prototyyppiä vastaava. Kuvassa 31 on vaihejännitteen harmoniset komponentit, kun kompensointi on pois päältä. Harmonisista yhtälön 8 perusteella laskettu THD simuloiduille jännitteille on 12,2 % ja mitatuille jännitteille 14,4 %. Kuvan 31 perusteella ero tulee pääosin resonanssitaaajuisista komponenteista. Muutaman prosenttiyksikön ero niissä voi johtua jo siitä, että DTC on luonut eri mittauksissa erilaisen jännitepulsssikuvion, mikä on aiheuttanut erilaisen resonanssitilan suodattimessa. Lisäksi tyhjäkäyntitestin perusteella sillan tuottamassa särössä on eroa simulaattorin ja prototyypin välillä. Yliaaltovirtojen vaikutus jännitteeseen on niin suuri, että standardin asettamat rajat

ylittyvät selkeästi.

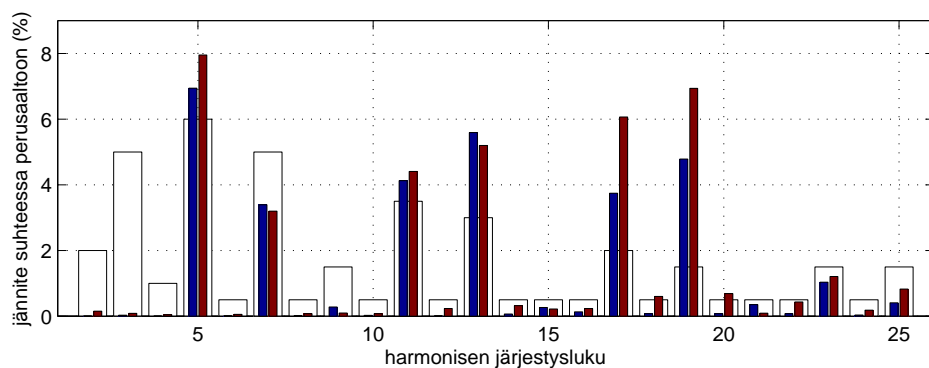
Kuvassa 30 on harmonisten kompensointi päällä. Harmonisista kompensoidaan viides, seitsemäs ja yhdeksäs. Kuvassa 32 on jännitteen harmoniset komponentit, kun kompensointi on käytössä. Jännitteen THD on 10,6 % simulaattorissa ja 6,22 % prototyypissä. Kompensointi toimii hieman paremmin prototyypissä. Molemmissa kompensoitavien yliaaltovirtojen vaikutus lähtöjännitteeseen laskee merkityksettömän pieneksi varsinkin, kun huomioidaan, että näin voimakas yliaaltokuormitus ei ole sähköverkossa tyypillistä.



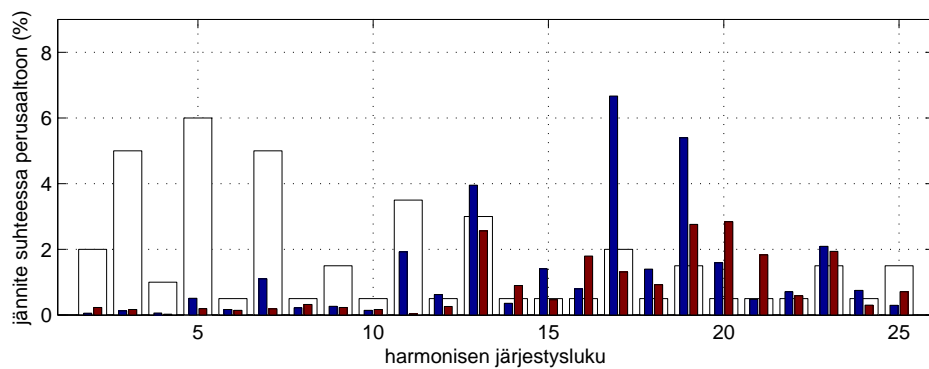
Kuva 29: Epälineaarinen kuorma, jänniteharmonisia ei kompensoitu, vaihejännitteet, vaihevirrat ja niiden spektrit, a, c, e ja g simuloitu, b, d, f ja h mitattu



Kuva 30: Epälineaarinen kuorma, jänniteharmoniset kompensoitu, vaihejännitteet, vaihevirrat ja niiden spektrit, a, c, e ja g simuloitu, b, d, f ja h mitattu



Kuva 31: Saarekeverkon vaihejännitteen harmoniset komponentit, jänniteharmonisia ei kompensoitu, sininen simuloitu, punainen mitattu, valkoinen standardin asettamat rajat



Kuva 32: Saarekeverkon vaihejännitteen harmoniset komponentit, jänniteharmoniset kompensoitu, sininen simuloitu, punainen mitattu, valkoinen standardin asettamat rajat

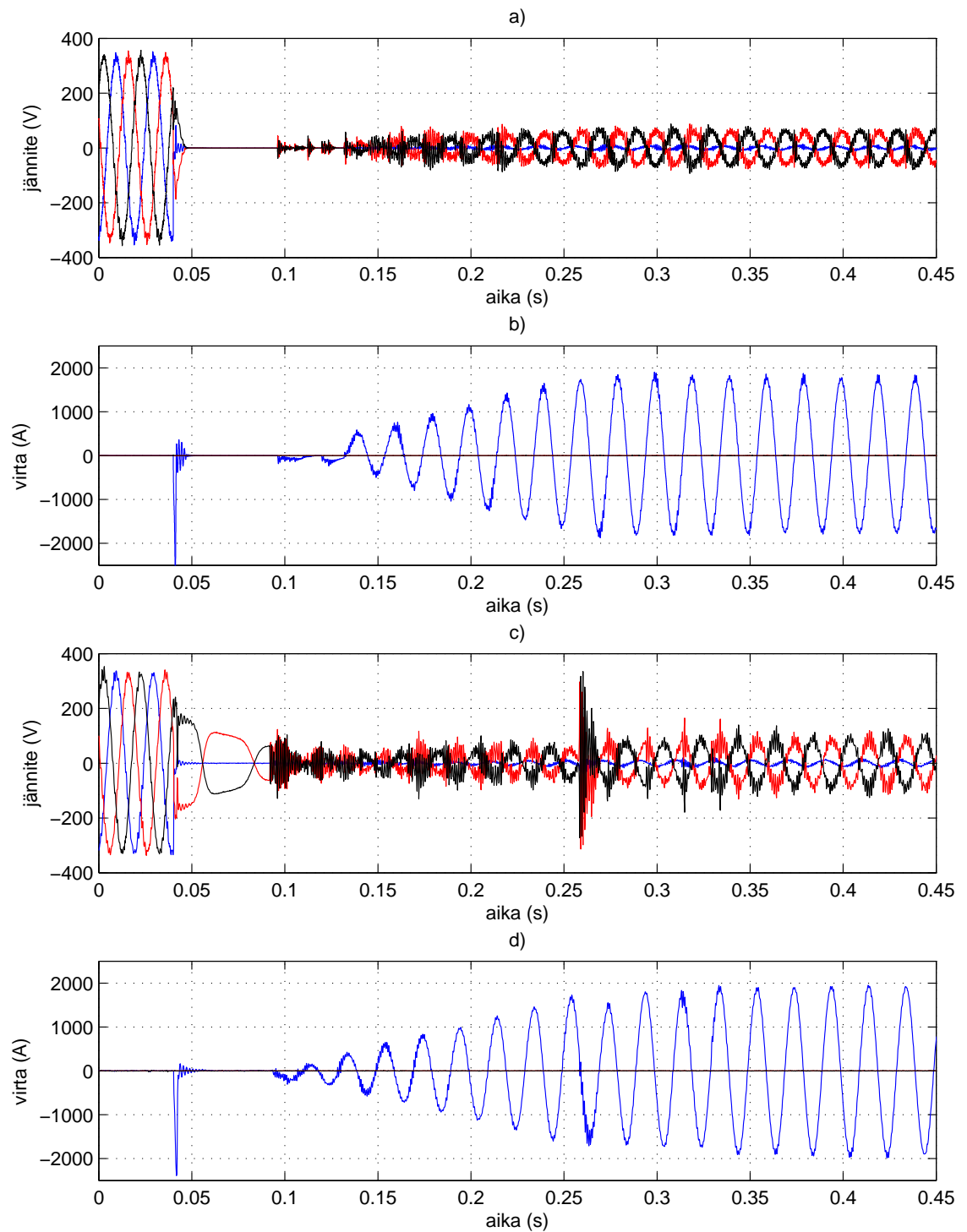
4.2.4 Oikosulku

Oikosulkutestissä verrataan simuloitua ja mitattua saarekeverkon toimintaa oikosulkutilanteessa. Testissä vaihe L1 oikosuljetaan nollajohtimeen 10 m:n pituisten kaapelien päässä muuntajasta. Simulaattorissa ei stabiiliussyistä voi tehdä täydellistä oikosulkua. Kuormana täytyy olla vähintään induktanssi, jonka läpi virtaisi nimellisjännitteellä ja perustaaajuudella 100-kertainen nimellisvirta. Oikosulun vaihesiirto on arviotu mittauksista, ja resistanssi on valittu sen mukaan. Viitteen [17] mukaan kaapeleiden impedanssi on tätä huomattavasti pienempi, joten suurempia arvoja ei ole tarpeen käyttää. Samasta syystä kuin epäsymmetrisen kuorman kohdalla myös muissa vaiheissa täytyy olla pieni kuorma, joten niissä käytetään resistansseja, joiden läpi virtaa 1 % nimellisvirrasta.

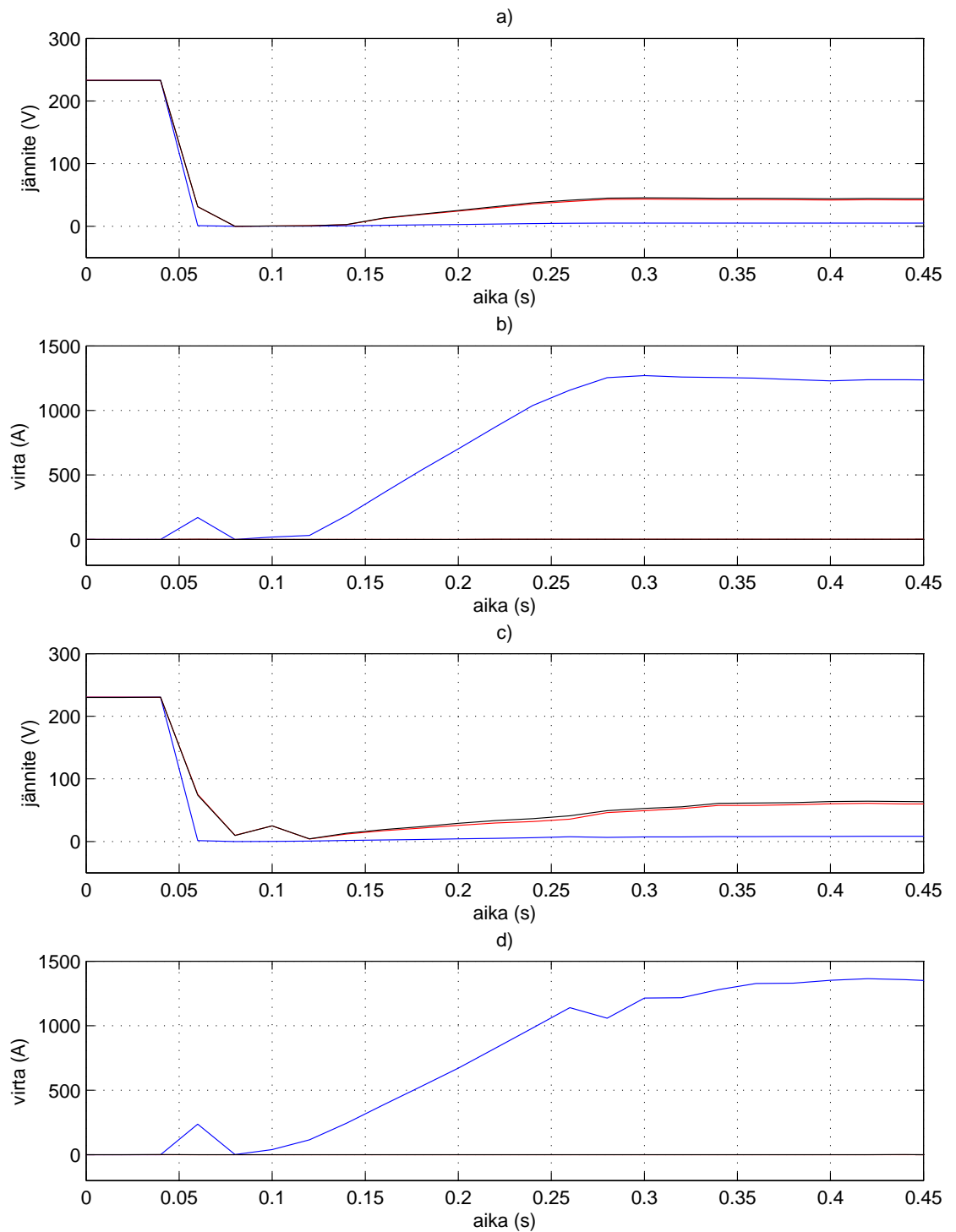
Kuvassa 33 on vaihejännitteet ja -virrat oikosulkutilanteessa. Hetkellä 0,04 s ensimmäinen vaihe oikosuljetaan nollajohtimeen. Jännite purkautuu prototyypissä eri tavalla simulaattoriin verrattuna aikavälillä 0,04 s ja 0,09 s, mikä johtuunee siitä, että simulaattorissa ei ole mallinnettu muuntajan epälineaarista magneettipiiriä.

Nopeasti nousevan ylivirran takia silta suojataan pysäyttämällä modulaattori hetkeksi, minkä jälkeen jännitettä nostetaan hitaasti rampitettuna. Kun saavutetaan säätöohjelmaan määritelty virtaraja, jännitettä ohjataan niin, että virta pysyy rajalla.

Kuvassa 34 jänniteiden ja virtojen tehollisarvot, jotka on määritelty Fourier-muunoksen avulla. Kuvien 34 b ja d perusteella virta käyttäytyy hyvin samalla tavalla simulaattorissa ja prototyypissä. Kuvassa 33 c hetkellä 0,26 s näkyvä resonanssi häiritsee hieman prototyypin virran nousua. Resonanssin syynä saattaa olla askelmainen muutos säädön tai modulaattorin ohjaamassa jännitteessä.



Kuva 33: Oikosulku ensimmäisessä vaiheessa, a) simuloidut vaihejännitteet, b) simuloidut vaihevirrat, c) mitatut vaihejännitteet, d) mitatut virrat



Kuva 34: Oikosulku ensimmäisessä vaiheessa, a) simuloidut vaihejännitteet, b) simuloidut vaihevirrat, c) mitatut vaihejännitteet, d) mitatut virrat

5 Yhteenveto

Tässä diplomityössä tutustuttiin vaihtosuuntaajan saarekekäyttöön, tehtiin sen pohjalta simulointityökalu saarekekäytön säätökehityksen tueksi ja verifioitiin simulointityökalun toiminta vastaavaan prototyypilaitteeseen verraten.

Luvussa 2 käytiin läpi saarekäytön vaatimuksia sekä esiteltiin ja arvioitiin tässä työssä simuloitu saarekekäyttökonsepti, joka pohjautuu DTC-verkkovaihtosuuntaajaan. Konseptin todettiin sopivan saarekekäytön toteuttamiseen, mutta joitain heikkouksia havaittiin verrattuna erikoistuneeseen saarekeverkkosuuntaajaan. Luvussa 3 esiteltiin simulaattorin toteutusta, käytiin läpi mallit, joita simulaattorissa käytetään, ja valittiin ratkaisumenetelmä mallien differentiaaliyhtälöitä varten. Luvussa 4 verrattiin simulaattorin ja vastaavan prototyypilaitteen toimintaa erilaisissa kuormitustilanteissa.

Työn tavoitteena oli arvioida saarekekäyttökonseptia, joka pohjautuu verkkovaihtosuuntaajalaitteistoon, ja toteuttaa simulointityökalu säätökehitystä varten. Kokonaisuutena diplomityö täyttää sille asetetut tavoitteet.

Tässä työssä käsitelty verkkovaihtosuuntaajalaitteisto soveltuu saarekekäytön toteuttamiseen. Kuitenkin varsinaista saarekeverkkosuuntaajaa toteutettaessa voisi seuraavia ratkaisuja muuttaa.

Modulaattorina DTC voi olla ongelmallinen saarekekäytössä. Kuten modulointia ja suodatusta käsittelevissä luvussa huomattiin, DTC tuottaa jännitteeseen taaajuuskomponentteja myös suodattimen resonanssitaajuudella. Tämä saattaa vaikeuttaa standardinmukaisen jännitteen [4] tuottamista, jos resonointi on voimakasta. Suodatuskappaleessa havaittiin resistiivisen kuormituksen vaimentavan resonanssia. Verkossa on paljon resistiivisiä kuormia, mikä saattaa helpottaa tilannetta. Vakio-kytkentätaajuisella modulaattorilla näitä ongelmia ei esiintyisi, koska sen tuottamat jännitekomponentit osuvat kytkentätaajuudelle ja sen kerrannaisille taajuuksille. Toisaalta, silloin nämä harmoniset kasvaisivat huomattavasti spektrissä.

Tarvittaessa resonanssia olisi mahdollista vaimentaa passiivisin tai aktiivisin menetelmin. Passiivisiin menetelmiin kuuluu esimerkiksi vaimennusvastus suodatinkondensaattorin rinnalla. Tämän ongelmana on, että vastuksen tarvitsee olla suhteellisen pieni ennen kuin vaimennusvaikutus on riittävä, mikä aiheuttaa suuret tehohäviöt. Viitteessä [18] ehdotetaan tämän ongelman kiertämiseksi vaimennusvastuksen emuloimista ohjelmallisesti. Hystereesimodulaattorin teho- ja loisteho-ohjeisiin lasketaan komponentit, jotka muuttavat kondensaattorin virtaa samalla tavalla kuin vaimennusvastus.

Ainoastaan jännitelähteenä toimiva suuntaaja saattaisi olla parempi toteuttaa LC-suodattimella. LCL-suodattimen suodatuskyky on merkittävästi LC-suodatinta parempi vain täysin resistiivisillä kuormilla. LC-suodattimen jännitesäädöstä saa helpommin tehokkaan virtasäädön ja jännitesäädön sarjaankytkennällä viitteiden [8] ja [9] tapaan. Myös LCL-suodattimessa voisi säätää kondensaattorin jännitettä samalla tavalla, mutta lisäksi tarvittaisiin verkon puoleisen suodatinkuristimen jännite-

häviön kompensointi. Jos toteutetaan suuntaaja, joka voi toimia jännitelähteenä ja jännitteeseen verkkoon liitettynä teholahteenä tilanteen mukaan, on LCL-suodatin suositeltavampi [8]. Myös, jos suodattimen ja verkon välissä tarvitaan muuntaja, on suodatinkondensaattorin ja verkon välissä merkittävästi induktanssia. Tällöin ei säädön kannalta ole suurta merkitystä, kumpaa suodatinta käytetään.

Tavoitteena oli, että simulaattori sopii suuntaa-antavaan analyysiin, saarekekäytön esittelyyn ja säätöalgoritmien kehittämiseen. Tavoitteen kannalta tärkeintä on, että simulaattorilla on mahdollista testata kaikkia tarvittavia säätöominaisuuksia, jotka pohjautuvat sähköverkon tyypillisten kuormien vaikutuksiin. Näitä ovat kuormituksen aiheuttamien erilaisten jännitehäviöiden kompensointi ja virran rajoitus. Jännitehäviöt on tarvittaessa kompensoitava myös epäsymmetrisillä ja epälineaarisilla kuormilla.

Vertailumittausten perusteella simuloidut kuormien ja säädön aiheuttamat muutokset jännitteessä ovat oikeansuuntaisia, mutta suuruudeltaan vaihtelevia. Suurimmat erot ovat resonanssitaajuudella 850 Hz:n ympäristössä ja sen yläpuolella. Erot viittaavat siihen, että mallit ja parametrit eivät ole aivan oikeanlaiset.

Simulaattori sopii säätökehitykseen, koska algoritmejä kehitettäessä tärkeintä on oikeansuuntainen vaikutus. Säädön parametrit viritetään yksityiskohtaisesti todellisen laitteen avulla joka tapauksessa. Simulaattoria ei kuitenkaan voi käyttää yksityiskohtaiseen analyysiin. Sähköön laatua ja häviöitä ei voi arvioida tarkasti.

Simulaattoria voisi parantaa mittaamalla suodattimen ja muuntajan komponenttiarvot taajuuden funktiona. Silloin olisi mahdollista tehdä tarkemmat taajuusriippuvat mallit kaikille kuristimille. Tarkempi malli mahdollistaisi sähköön laadun ja häviöiden tarkemman analysoinnin simulaattorilla.

Viitteet

- [1] Mohan, N.; Robbins, W.P.; Undeland, T.M.; Nilssen, R.; Mo, O.; *Simulation of power electronic and motion control systems-an overview*; Proceedings of the IEEE, Volume 82, Issue 8, elokuu 1994, sivut: 1287 - 1302
- [2] Salonen, P.; Kaipia, T.; Nuutinen, P.; Peltoniemi, P.; Partanen, J.; *An LVDC Distribution System Concept*; NORPIE/2008, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, 9.-11. kesäkuuta 2008
- [3] Kovacs K.; Racz I.; *Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen*; Budapest, Verlag der Ungarische Akademie, 1959
- [4] *SFS-EN 50160 Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet*, Suomen standardoimisliitto SFS 2008
- [5] Mohan, N.; Robbins, W.P.; Undeland, T.M.; *Power electronics : converters, applications and design*; 3. painos, Wiley, 2002.
- [6] Tiitinen, P.; Surandra, M.; *The next generation motor control method, DTC direct torque control*; Proceedings of the 1996 International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1996., Volume 1, 8.-11. tammikuuta 1996, sivut: 37 - 43
- [7] Tarkiainen, A.; Pollanen, R.; Niemela, M.; Pyrhonen, J.; Vertanen, M.; *Compensating the island network voltage unsymmetry with DTC-modulation-based power conditioning system*; IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 40, Issue 5, syyskuu-lokakuu 2004, sivut: 1398 - 1405
- [8] Chen, C.; Lai, J.; Wang, Y.; Park, S.; Miwa, H.; *Design and Control for LCL-Based Inverters with Both Grid-Tie and Standalone Parallel Operations*; Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. IEEE, 5-9 lokakuuta 2008, sivut: 1 - 7
- [9] Mattavelli, P.; *Synchronous-frame harmonic control for high-performance AC power supplies*; IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 37, Issue 3, toukokuu-kesäkuu 2001, sivut: 864 - 872
- [10] Teodorescu, R.; Blaabjerg, F.; *Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in stand-alone and grid-connected mode*; IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 19, Issue 5, syyskuu 2004, sivut: 1323 - 1332
- [11] Borup, U.; Enjeti, P.N.; Blaabjerg, F.; *A new space-vector-based control method for UPS systems powering nonlinear and unbalanced loads*; IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 37, Issue 6, marraskuu-joulukuu 2001, sivut: 1864 - 1870

- [12] Li, D.; Tymerski, R.; Ninomiya, T.; *PECS-Power Electronics Circuit Simulator*; The 7th Workshop on Computers in Power Electronics, 2000. COMPEL 2000., 16.-18. heinäkuuta 2000, sivut: 159 - 165
- [13] de Leon, F.; Semlyen, A.; *Time domain modeling of eddy current effects for transformer transients*; IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 8, Issue 1, tammikuu 1993, sivut: 271 - 280
- [14] Luomi, J.; *Sähkökäyttöjen suunnittelu*; Espoo, Teknillisen korkeakoulun sähkötekniikan laitos, 2008
- [15] Koivo, H.; *Tietokonesimulointi*; Espoo, Teknillisen korkeakoulun systeemiteknikan laboratorio, 2008
- [16] Davis, P.; Rabinowitz, P.; *Numerical integration*; Waltham (Mass.) : Blaisdell, 1967.
- [17] *Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja*; ABB, 2000
- [18] Serpa, L.A.; Ponnaluri, S.; Barbosa, P.M.; Kolar, J.W.; *A Modified Direct Power Control Strategy Allowing the Connection of Three-Phase Inverters to the Grid Through LCL Filters*; IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 43, Issue 5, syyskuu-lokakuu 2007, sivut: 1388 - 1400